



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

거가대교 침매터널 잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례 분석

A Case Study of Nitrox Usage in Diving Operation of the
Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel



2015년 8월

한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

해양관리기술학과 수중잠수과학기술전공

우 대 희

본 논문을 우대회의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 재 수 (인)

위 원 강 신 범 (인)

위 원 강 신 영 (인)



2015년 8월

한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	ix

1. 서 론

1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구의 목적	2
1.3 연구의 문제와 방법	3
1.3.1 연구의 문제	3
1.3.2 연구의 방법	3
1.4 용어의 정의	7

2. 나이트록스의 이론적 고찰

2.1 나이트록스 잠수의 개념	10
2.2 나이트록스 잠수의 특성	11
2.2.1 나이트록스의 장점	11
2.2.2 산소 독성	13
2.2.3 최적기체와 ppO_2	17
2.2.4 MOD와 EAD	20
2.3 나이트록스 시스템 구성	21
2.3.1 산소청결	21
2.3.2 나이트록스의 혼합	22
2.3.3 나이트록스의 분석	28
2.3.4 나이트록스의 보관	29
2.4 수중 산소감압	33

3. 침매터널 잠수 자료 분류 및 분석

3.1 거가대교 침매터널 잠수 자료	36
3.1.1 잠수사 현황 및 임무	44
3.1.2 사용한 기체의 분류	47
3.1.3 수심별 잠수작업 분포	48
3.1.4 나이트록스의 분류	54
3.1.5 감압 기체의 분류	57
3.1.6 사용한 다이브 테이블	62
3.1.7 표면공급식 잠수와 웨트벨	64
3.2 나이트록스와 공기의 안전성 비교	68
3.2.1 나이트록스와 공기의 감압병 발생률과 발생원인	68
3.2.2 나이트록스와 수중 산소감압의 효과	69
3.3 나이트록스와 공기의 효율성 비교	71
3.3.1 최적기체와 공기의 NDL 비교	71
3.3.2 나이트록스와 공기의 작업시간 비교	76
3.3.3 나이트록스와 공기의 감압 시간 비교	79
3.4 나이트록스의 경제성 비교	80
3.4.1 공사 기간의 단축	80
3.4.2 공사비용의 절감	83

4. 분석 결과

4.1 나이트록스의 안전성 분석 결과	86
4.2 나이트록스의 효율성 분석 결과	88
4.3 나이트록스의 경제성 분석 결과	91

5. 결론

참고문헌	94
------------	----



List of Tables

Table 1. Best mix	18
Table 2. NOAA oxygen exposure limits	19
Table 3. Diving industry's commonly accepted colour coding	31
Table 4. Summary of dive team	44
Table 5. General tasks for dive plan immersion	45
Table 6. Comparison of air and nitrox dive times	47
Table 7. Nitrox vs. Air diving distribution by depth	51
Table 8. Number of dives below 30 m depth	53
Table 9. Use of various nitrox gases	54
Table 10. Comparison of various decompression type	57
Table 11. Oxygen decompression data of various nitroxes	60
Table 12. Classification of decompression table by depth	62
Table 13. Average depth and working time of various decompression table	64
Table 14. Usage of surface supplied diving system vs. wet bell	66
Table 15. Effects of current speed on diving operations	67
Table 16. DCS record in Busan-Geoje Fixed Link Project	69
Table 17. Summary of In-water oxygen decompression	70
Table 18. NDL comparison of air and nitrox	72
Table 19. NDL comparison of USN and NOAA	74
Table 20. Nitrox diving data	76
Table 21. Air diving data	77
Table 22. Comparison of nitrox and air diving at 24 m	80
Table 23. Daily tariff rates	83
Table 24. Cost comparison of air and nitrox diving	84

Table 25. Minimum required diving equipments for air/nitrox	85
Table 26. Case demonstrating causative and/or provocative factors and other external factors	87
Table 27. Work efficiency in the average depth	91



List of Figures

Fig. 1. Diving data at Busan-Geoje Fixed Link Project	5
Fig. 2. Diving supervisor's logbook	6
Fig. 3. Dissolved nitrogen curve	12
Fig. 4. Predicted pulmonary and cerebral toxicity limits of exposure to varying partial pressures of oxygen	14
Fig. 5. CNS single exposure limits	16
Fig. 6. Labeling of cylinder	22
Fig. 7. Nitrox double filtration partial pressure mixing system	23
Fig. 8. NOAA continuous nitrox mixer	24
Fig. 9. LlewocSIS nitrox stik continuous gas blender	25
Fig. 10. PSA system	26
Fig. 11. Separation membrane mechanism	27
Fig. 12. DeNitrogenated Air system	28
Fig. 13. Large gas storage banks	30
Fig. 14. Examples of bands and quadrants	30
Fig. 15. Typical examples of quads and banks	32
Fig. 16. Extra equipments for In-water decompression	33
Fig. 17. Diver using a BIBS which delivers oxygen for In-water decompression	34
Fig. 18. Tender helps to remove diver's gear after finishing In-water decompression	35
Fig. 19. Concrete elements are closed in both ends with steel bulkheads and are designed to float with a small freeboard	37
Fig. 20. Elements are transported by the aid of tug boats to the position where they shall be immersed	37

List of Figures

Fig. 21. Towing route from precasting yard to immersion point	38
Fig. 22. External positioning system	39
Fig. 23. Preparations before immersion	40
Fig. 24. Push-pull jack and Primary support beam	40
Fig. 25. Transponder, Sensor, Taut wire unit	41
Fig. 26. Setting up a Taut wire system	42
Fig. 27. GINA gasket and GINA protector	42
Fig. 28. Dive support barge	43
Fig. 29. Diver's logbook	46
Fig. 30. Proportion of nitrox use vs. air use	48
Fig. 31. Diving depth in Busan-Geoje Fixed Link Project	49
Fig. 32. Diving work distribution by depth	50
Fig. 33. Nitrox vs. Air diving work ratio by depth	52
Fig. 34. Average depth of each nitrox gas	55
Fig. 35. Nitrox distribution by depth	56
Fig. 36. Distribution of various decompression gas	58
Fig. 37. Average depth of using different decompression gas	59
Fig. 38. Average diving depth and actual working time with oxygen decompression	61
Fig. 39. Use of decompression table by depth	63
Fig. 40. Wet bell and LARS	65
Fig. 41. Depth-time plot of all dives	68
Fig. 42. NDL comparison of best mix and air	73
Fig. 43. NDL comparison of USN and NOAA	75
Fig. 44. Gas usage in the same NDL	77

Fig. 45. Equivalent air depths for decompression with enriched air mixtures	78
Fig. 46. Actual construction period vs. Air diving simulation based scheduling	82
Fig. 47. NDL comparison of various gases	89
Fig. 48. Comparison of the efficiency of the gas use in the same depth	90
Fig. 49. Economic evaluation of air and nitrox diving	92



A Case Study of Nitrox Usage in Diving Operation of the Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel

Woo, Dae Hee

Major in Underwater Diving Science and Technology
Department of Maritime Management Technology
Ocean Science and Technology School

Abstract

The thesis tried to evaluate the efficiency and economical benefit of nitrox diving by comparing with air diving. A survey was made of all commercial dives carried out on the diving site of the immersed tunnel of Busan-Geoje Fixed Link Project GK from 2008 to 2010. Data analysis was done from a retrospective analysis of dive logs submitted by the diving contractors. In all, 651 men-dive records were examined and analysed under 15 parameters, such as dive depth and time, diving table depth and time, breathing and decompression gas, etc. Nitrox diving accounted for approximately 70% of the dives, the other 30% was air diving.

As the result, the study confirmed that the dives using nitrox have three obvious benefits compared to those using air at a given depth. Firstly, the diver use nitrox as a breathing gas and if using 100% oxygen for decompression is to minimize the probability of occurrence of decompression sickness. In addition, it was confirmed that the decompression time can be shortened.

Secondly, the dives using nitrox had, in general, a much more working time than those using air at a given depth. In addition the less amount of residual nitrogen remaining in the body of the diver after diving operation.

Finally, the nitrox confirmed the reduction of construction costs and shortening the working time been made, as a result of comparing the virtual work period with air diving and actual construction period with nitrox.

KEY WORDS: Nitrox diving 나이트록스 잠수; Commercial diving 산업 잠수; Immersed tunnel 침매터널; In-water oxygen decompression 수중 산소감압.



제 1 장 서 론

산업 잠수 현장에서 잠수작업을 수행하는데 있어서 최우선 목표는 안전이며, 그 다음은 경제성이다. 일반적으로 산업 잠수에서는 잠수 헬멧과 엄빌리컬(umbilical)을 사용하는 표면공급식 잠수 시스템(surface supplied diving system)이 기본으로 여겨지고 있는데, 대개 50 m 이내의 수심에서는 공기를 호흡 기체로 사용하고 그 이상의 수심에서는 헬리옥스(heliox)를 사용한다. 그러나 최근 감압의 효율성을 높이기 위해 산업 잠수에서도 과학 잠수 및 레저 잠수에 도입된 나이트록스를 사용하기 시작하였다. 본 논문에서는 이와 관련하여 2010년 거가대교 침매터널 작업 현장에서 사용한 나이트록스 잠수 자료들을 분석하여 잠수작업의 안전성, 효율성 및 경제성 평가를 시도하였다.

1.1 연구의 필요성

산업 잠수에 나이트록스(nitrox)라는 기체를 사용하기 시작한 것은 극히 최근의 일이라 할 수 있다. 1970년대에 미국의 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의해 과학 잠수 분야에 나이트록스가 도입된 이래 레저 잠수에 정착되기까지는 약 20년이라는 세월이 필요하였으나, 테크니컬 잠수의 활성화와 함께 나이트록스 사용에 대한 여러 가지 의문점들이 빠르게 해소되기 시작하여 이제는 사용 범위가 산업 잠수 분야에까지 확장되고 있다(강신영, 2010). 그러나 아직은 나이트록스와 관련된 기준 및 규정이 집단마다 약간씩 다르며, 보완 작업이 진행되고 있다. IMCA(International Marine Contractors Association)와 함께 국제 산업 잠수 조직의 양대 산맥이라 할 수 있는 ADCI(Association of Diving Contractors International)에서는 2014년 6월에 나이트록스 분야의 조항이 대폭 추가된 새로운 기준이 발표되기도 하였다(ADCI, 2014).

국내에서는 아직 이러한 국제적인 현황 및 추세가 산업 잠수 업계에 제대로 알려지지 않은 상태이며, 따라서 기준이나 법령에도 이에 대해 전혀 보완되지 않고 있는 실정이다. 그런 상황에서 부산-거제 간의 거가대교 침매터널 수중 공사에 외국 업체와 국내 산업 잠수사들이 참여한 가운데 현장의 잠수작업에 나이트록스를 사용하여 작업 효율성을 성공적으로 높인 사례가 알려졌고, 그 후 국내 산업 잠수 현장에서도 비공식적으로 나이트록스를 사용하기 시작하였다. 그리고 2014년 세월호 작업 현장에서도 나이트록스 사용에 대한 장비 TF 팀의 비공식적인 논의 과정을 거쳐 현장에 나이트록스 사용이 인가된 바 있다. 그러나 세월호 잠수작업과 관련된 몇 건의 인명사고와 함께 적법성과 관련된 예민한 문제들이 있어 이 논문을 작성하고 있는 시점에서 잠수작업에 대한 구체적인 정보들이 아직 알려지지 않고 있다.

따라서 현재 대한민국 산업 잠수 분야에 일부 음성적으로 사용되고 있는 나이트록스 혼합기체에 대한 정확한 정보를 파악할 필요성이 시급히 대두되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 산업 잠수 현장에서 나이트록스 사용의 안전성, 효율성, 경제성을 재조명하여 산업적 가치를 규명하고자 한다.

1.2 연구의 목적

본 연구에서는 산업 잠수 분야에서 공기 대신 나이트록스 사용으로 얻을 수 있는 효율성 향상 및 경제적 혜택을 실제 사례를 통해 분석해 보고 나이트록스와 공기 잠수의 차이점이 잠수사의 감압 질환 발생 확률에 미치는 영향을 알아보고, 아울러 수중 산소감압의 긍정적 측면을 통합적으로 살펴보려 한다. 본 연구의 결과는 세월호 잠수작업에서 사용한 나이트록스 잠수 연구가 진행된다면 향후 산업안전보건법을 비롯한 산업 잠수와 관련된 법령 개정을 위한 기초 자료를 제공하고, 산업 잠수 현장에서 더욱 안전하고 경제적인 작업을 수행하는데 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

1.3 연구의 문제와 방법

1.3.1 연구의 문제

국내에서도 산업 잠수 분야 외의 다른 분야의 잠수 활동에서는 나이트록스를 사용한 경우가 많이 알려져 있다. 예를 들어 테크니컬 잠수 분야에서는 이미 국내에서도 사용된 지 거의 20년이 되지만 산업 잠수와는 사용 방법과 적용 형태가 전혀 다르므로 본 연구에서는 언급하지 않았다. 즉 본 연구의 초점은 표면공급식 잠수 시스템에서 나이트록스 사용이라고 한정 지을 수 있다. 이러한 가이드라인에 의해서 본 연구의 목적을 달성하기 위해 다음과 같은 연구 문제를 설정하였다.

첫째, 안전성의 측면에서 공기 대신 나이트록스 사용으로 인한 이득은 무엇인가?

둘째, 산업 잠수 현장에 나이트록스를 작업용 기체로 운용할 경우 작업 효율성이 어느 정도 개선될 것인가?

셋째, 경제적 측면에서 나이트록스 기체 사용으로 인한 혜택은 어느 정도일 것인가?

1.3.2 연구의 방법

본 연구에서는 위에 언급한 세 가지 질문에 대한 해답을 얻기 위해 2008-2010년, 부산-거제 간 침매터널 수중 공사의 자료를 활용하였다. 아직 국내에서는 산업 잠수 현장에서의 나이트록스 사용에 대한 공식적인 자료가 전무하기 때문에 본 연구는 상기 자료에 국한할 수밖에 없었다.

거가대교 침매터널 작업은 3년간 총 1,200회 이상의 잠수작업과 1,200시간 이상의 수중 작업시간이 소요되었다. 그중 본 논문은 대한민국의 산업 잠수사들이 수행한 651회의 잠수작업 자료를 회고 분석(retrospective analysis) 기법을 이용해 분석하였다.

나이트록스와 공기를 사용한 651회의 실제 잠수 자료는 날짜별로 표면공급식 잠수와 웨트벨의 잠수방식과 작업 수심, 사용한 기체와 감압용 기체, 산소감압

여부와 잠압 시간, 해저체류시간과 다이브 테이블, 30 m 이하의 잠수, 잠압병 (DCS: Decompression Sickness) 발생건수, 최적기체와 나이트록스의 NDL, 실제 공사 기간과 가상의 공사 기간 등 총 15개의 파라미터로 구분하여 각각의 특징을 분석해보고자 하였으며 실제 나이트록스 잠수와 공기 잠수의 차이를 비교해 효율성의 차이를 살펴보았다.

잠수 방식은 사용한 장비에 따라 표면공급식과 웨트벨로 구분하였으며, 사용한 기체는 크게 나이트록스와 공기로 구분하였다. 나이트록스는 다시 산소의 함량에 따라 7가지 종류로 구분하여 정리하였다. 잠압은 잠압 기체의 종류별로 따로 구분하였으며, 특히 수중 산소잠압은 별도로 정리하였다. 마지막으로 잠수 환경에 따라 다르게 적용된 다이브 테이블을 구분하여 분석하였다(Fig. 1).

본 연구를 위한 잠수작업 자료는 침매터널 작업 현장의 잠수감독관 로그북을 참고하였다. 잠수감독관 로그북은 5개 항목으로 구분된다. 첫 번째 항목에는 잠수작업을 시행한 날짜와 작업선박의 이름을 포함한 작업 지역의 명칭, 계약업체의 정보를 적고 잠수감독관이 서명한다. 두 번째 항목에는 표면공급식 잠수를 포함한 잠수의 방식과 호흡용 기체의 종류, 잠수사가 도달한 최대 수심, 잠압 형태 및 잠압 진행 시간, 작업의 목적 및 작업 내용 등을 기술한다. 세 번째 항목은 포화잠수에 관한 기록이며, 네 번째 항목은 사고 사항과 특이사항, 기타 관련된 내용을 적는다. 마지막으로 잠수 총괄 책임자(superintendent)의 서명과 잠수 회사의 직인을 날인한다. Fig. 2에 거가대교 침매터널 잠수작업에서 사용한 잠수감독관 로그북이 나와 있다.

점수	날짜	표면풍압식점수	햇볕	수심(m)	호출기체	감압기체	산소감압	감압시간	해저체류시간	다이브테이블	Remarks
1	2008/2/26	O		2	Air	-	-	0	33	nsi88-Air	
2	2008/2/27	O		2	Air	-	-	0	25	nsi88-Air	
3	2008/2/27	O		2	Air	-	-	0	21	nsi88-Air	
4	2008/3/1	O		3	Air	-	-	0	122	nsi88-Air	
5	2008/3/1	O		3	Air	-	-	0	10	nsi88-Air	
6	2008/3/3	O		3	Air	-	-	0	47	nsi88-Air	
9	2008/3/5	O		5	Air	-	-	0	59	nsi88-Air	
83	2008/11/10	O		15	Air	Air	-	2	11	nsi88-Air	
85	2008/11/13	O		24	Nitrox40	Nitrox40	-	14	74	Nitrox40/60	Nitrox 40 사용 시작
86	2008/11/14	O		17	Air	Air	-	24	103	DCIEM	
87	2008/11/14	O		17	Air	-	-	0	25	DCIEM	
88	2008/11/17	O		24	Nitrox40	Nitrox40	-	7	53	Nitrox40/60	
145	2009/1/17	O	O	8	Nitrox40	-	-	0	16	Nitrox40/60	Wet Bell Test
147	2009/1/19	O		25	Nitrox40	Nitrox40	-	1	24	Nitrox40/60	
148	2009/1/19	O		6	Nitrox40	-	-	0	30	Nitrox40/60	
313	2009/5/7		O	33	Nitrox34	Nitrox34	-	21	64	V-planner	
314	2009/5/8		O	36	Nitrox34	Nitrox34	-	31	82	V-planner	
334	2009/5/15		O	33	Nitrox34	-	O	4	32	V-planner	100% O2 감압 시작
335	2009/5/15		O	33	Nitrox34	Nitrox34	O	4	33	V-planner	
410	2009/7/5		O	37	Nitrox32	Nitrox32	O	29	83	V-planner	
429	2009/8/30		O	33	Air	-	-	0	12	US Navy	
430	2009/8/30		O	33	Air	-	-	0	14	US Navy	
437	2009/9/2		O	33	Air	-	-	0	12	US Navy	
439	2009/9/10	O		34	Air	-	-	0	40	DCIEM	
440	2009/9/10	O		34	Air	-	-	0	39	DCIEM	
441	2009/10/5	O		15	Nitrox32	-	-	0	100	V-planner	
442	2009/10/5	O		15	Nitrox32	-	-	0	83	V-planner	
491	2009/10/30		O	38	Nitrox32	Nitrox32	O	25	95	V-planner	
552	2010/1/17		O	33	Nitrox34	Nitrox34	O	13	58	V-planner	
570	2010/2/28	O		39	Air	Air	-	3	125	nsi88-Air	
571	2010/3/3	O		40	Nitrox30	Nitrox30	-	16	33	V-planner	
572	2010/3/5	O		41	Air	Air	-	1	70	nsi88-Air	
574	2010/3/5	O		41	Air	Air	-	1	75	nsi88-Air	
649	2010/6/9	O		14	Nitrox38	Nitrox38	-	0	55	V-planner	
650	2010/6/10	O		15	Nitrox38	Nitrox38	-	0	75	V-planner	
651	2010/6/11	O		13	Nitrox38	Nitrox38	-	0	58	V-planner	

Fig. 1 Diving data at Busan-Geoje Fixed Link Project

Diving Supervisor's Logbook

Part 6 – Record of Supervision

Date 30/06/09 Supervisor's Signature [Signature]
 Name of Diving Contractor: OTN
 Address of Diving Contractor: Netherlands
 Dive Location: No. 12 TE JOINT Vessel/Installation: DR Hae Yang 7001

Direct Supervision/Overall Supervision (delete as appropriate)

BARGE : HAE YANG 7001
OFF. NO : USB-078308

Surface/Bounce Dives

	No. of Dives	Type	Depth	No. of Divers	Type of Decompression	FLAG: ULSAN KOREA Duration of Dive: 995 tons Description of Work
A	360	WET BELL	35M	1	12m 02' : 32% 5m 05' : 35% 6m 04' : 02% 3m 07' : 02%	: 62 Connected Diving to support 13car
B	361	WET BELL	35M	1	12m 02' : 32% 5m 05' : 32% 6m 04' : 02% 3m 07' : 02%	: 65 prepare for lifting support beam
C						02:07 356:03
D						
C/f	361				Running Totals	358:10

Saturation Dives

	No. of Dives	Storage Depth	Excursion Depth	No. of Divers	Decompression Range	Total Duration of Dive	Description of Work
E							
F							
C/f					Running Totals		

Incidents and remarks: V-PC NITROX 32%
in Water O2 Deco stop

Diving Contractor Rep.'s Signature: _____ Company Stamp

OTN
N.H. PLEIZIER
SUPERINTENDENT

STRUKTON AFZINK TECHNIEKEN BV
3rd floor, Hyeongja Building,
1205-1, Yongwon-dong, Jinhae-si,
Gyeongsangnamdo, #645-510
South Korea

Fig. 2 Diving supervisor's logbook(Busan-Geoje Fixed Link Project)

1.4 용어의 정의

1) ATA(Atmosphere Absolute)

절대압력의 단위, ‘Bar’ 와 함께 부분압 표시에 사용됨.

2) 최적기체(Best mix)

나이트록스 기체를 사용하는 잠수에서 작업시간을 최대로 길게 연장해주는 산소비율.

3) %CNS

중추신경계 산소 독성(central nervous system oxygen toxicity) 노출 비율, 산소나 나이트록스를 사용하여 감압할 때 중추 신경계 산소 독성을 피하기 위해 계산함.

4) DNAX(DeNitrogenated Air)

멤브레인 분리 방식을 사용하여 나이트록스를 제조하는 기법.

5) EAD(Equivalent Air Depth)

동등 공기 수심.

6) MOD(Maximum Operating Depth)

잠수 시 사용할 나이트록스와 ppO_2 의 허용한계를 고려하여 안전하게 잠수할 수 있는 최대 수심.

7) ppO_2 (partial pressure of oxygen)

산소 부분압의 다른 표기.

8) Sur-D(Surface Decompression)

육상에서 챔버를 사용하는 감압.

9) UPTD(Unit Pulmonary Toxic Dose)

폐 산소 중독 단위량, 폐 시스템이 견딜 수 있는 산소량을 계산한 값을 의미

한다. 누적되는 폐산소량을 계산하는 UPTD 계산법은 치료용 산소의 노출을 감시하는 방법으로 1972년 소개되었다.

10) 산업 잠수의 스쿠버

산업 잠수 분야에서 스쿠버는 국가마다 조금씩 다른 규제를 받지만 대체로 수심 18 m 이내에서 간단한 수색과 검사 분야에 제한된다. 예로 북해의 노르웨이 규정에 의하면 육상과의 통신 장치와 엄빌리컬이 없으면 스쿠버의 사용을 금하고 있으며, IMCA에서는 해양유전, 해양공사, 토목, 인양 등을 포함한 모든 해양 작업에서 스쿠버의 사용을 일절 허용하지 않고 있다(IMCA, 2003b).

11) USN(U.S. Navy) 다이브 테이블

20세기 초 영국의 생리학자인 John Scott Haldane의 연구에서 불활성 기체의 흡수와 배출이 지수 함수적으로 변한다는 것과 주위조직에 비해 과포화의 압력 차이(supersaturation gradients)를 보인다는 근거 하에 개발되어 많은 실험적인 시도와 세계 각국에서 사용한 결과를 토대로 변경되어 왔다. 하지만 이 다이브 테이블에 따르더라도 감압 잠수, 심해 잠수, 그리고 비감압의 한계점에 근접할 때 불가피하게도 감압병이 약 1-5% 정도 생긴다는 보고가 있다.

12) DCIEM 다이브 테이블

캐나다 국방 및 민간 환경의학 연구소(DCIEM: Defense and Civil Institute of Environmental Medicine of Canada)는 컴퓨터를 활용한 감압 모델을 기반으로 30년간 수천 번의 다이빙을 통한 자료를 토대로 DCIEM 다이브 테이블을 개발하고 발전시켰다. 1992년 공기, 나이트록스, 헬리옥스 다이브 테이블을 첫 출판하였으며, 공기 잠수 테이블은 세계 각국의 해군, 산업 잠수 회사, 민간 잠수 연구 단체에서 채택하여 사용하고 있다. 공기 잠수 테이블을 기반으로 제작된 스포츠 잠수 테이블은 스포츠 잠수 단체들과 레크리에이션 잠수에서 많이 사용하고 있으며, 헬리옥스 잠수 테이블은 1986-1991년에 수심 100 m까지 혼합가스 잠수 운영을 위한 USN의 Partial pressure table을 대체하기 위해 개발되었다. DCIEM 다이브 테이블은 인상적인 잠수 연구 시설의 사용으로 더욱 발전되고 개선되었다. 1978년, 이 연구 시설에서는 수온 3 ℃의 냉수를 채운 지름 약 2.1 m의 고압 챔버를 설치하여 수심 1,800 m까지 가압하는 시뮬레이션 잠수를

8,800회 이상 실시하였다(DCIEM, 1992).

DCIEM 다이브 테이블은 많은 현장 자료와 기술적 연구를 바탕으로 가장 안전한 다이브 테이블 중 하나로 받아들여지고 있으며, 특히 영국과 같이 수온이 낮은 지역의 잠수작업에서 많이 사용한다.

13) V-planner 산업 잠수 다이브 테이블(V-planner commercial diver)

1986년 Yount, Hoffman이 개발한 VP 모델(The Varying Permeability Model)을 기반으로 제작되었다. 미세기포를 계산하고 그 크기의 변화를 수학적으로 추적하는 방식으로 전통적인 감압 모델보다 보수적으로 감압을 시행한다. 테크니컬 잠수에 주로 사용되었으며, 그 후 좀 더 발전하여 덴마크 해양청의 승인 하에 산업 잠수용 표면공급식 잠수작업을 위한 모델이 제작되었다(HHS Software Corp, 2015).



제 2 장 나이트록스의 이론적 고찰

2.1 나이트록스 잠수의 개념

나이트록스란 간단히 말해 질소와 산소의 혼합물이다. 우리가 이 세상에 태어나서 처음으로 호흡한 것도 나이트록스이다. 사실 태어난 이후 매일 계속 호흡하고 있는 공기도 나이트록스의 일종이다.

공기는 나이트록스 21이라고 표기한다. 즉 산소 21%와 질소 79%가 있다는 뜻이다. 보통의 대기압 하에서는 공기를 normoxic(normoxic) 혼합물이라 부른다. normoxic이란 과학용어로 통상의 산소 압력(normal oxygen pressure)이라는 뜻이다.

산소의 혼합비가 21% 이상의 나이트록스는 일반적으로 인 리치드 에어 나이트록스(enriched air nitrox) 또는 EANx라 부르는데, 여러 가지 잠수에 중요한 이득을 주고 있다. 잠수사의 감압 의무는 잠수 중에 흡수된 질소의 양에 따라 결정된다. 체내에 흡수되는 질소 흡수의 빠르기와 흡수되는 전체 질소량은 호흡하는 기체 중의 질소의 부분압에 의해 결정된다. 만약 우리가 호흡하는 기체 속의 질소를 감소시키고 그 양만큼 산소를 추가하면, 산소는 신진대사에 의해 소모가 될 것이므로 우리는 체내 질소 흡수율을 줄일 수 있게 된다.

잠수 중 호흡하는 기체에 질소가 낮게 포함되어 있다면, 우리 몸에 녹아드는 질소의 양도 작게 된다. 따라서 체내에 흡수되는 질소량도 작게 된다. 이 간단한 원칙이 EANx 혼합 기체 잠수를 할 때, 감압 측면에서의 이득의 기본이 되고 있다. 그러나 이 단순한 변화는 많은 추가적인 문제를 야기할 수 있다. 공기 잠수시 일어나는 모든 문제, 예를 들면 압력 손상, 공기색전증, 감압병, 산소 중독 등이 EANx 잠수시에도 일어난다. 또한 산소 중독과 잘못된 EANx 기체 혼합으로 인한 문제 발생 가능성이 잠재적으로 항상 존재한다.

EANx 잠수는 1차 세계대전 전에 시작되었고, 독일과 영국의 잠수 기술 개발 회사가 공기에 포함된 질소를 줄여서 얕은 수심에서 감압을 하도록 하기 위해 호흡용 혼합 기체로 실험을 시작했다. 영국의 Fluss-Davis와 독일의 드래거 같은 회사는 반폐쇄회로식, 완전폐쇄식 재호흡기를 생산하여 2차 세계 대전 중 사용하였고, 대전 후에도 군대에서 그대로 사용하는 장비로 처음부터 자리 잡았다. 이 규격화된 개방식, 폐쇄식 나이트록스 시스템의 기초를 경험으로 20세기 중반부터 세계적인 규모로 산업 잠수사와 과학연구 잠수사가 사용할 수 있게 되었다.

1970년대 후반 미국의 NOAA는 EANx의 사용으로 얻을 수 있는 현저한 이점을 인정하였고, 1979년 NOAA 다이빙 매뉴얼에 나이트록스 사용을 위한 테이블과 그 사용 절차를 공표하였다. 불과 몇 년 사이에 과학 탐사나 상급 수준의 레저 다이빙 단체들은 나이트록스의 수많은 장점들을 취하기 시작하였다.

이 EANx 감압 테이블은 그들이 기본으로 하고 있는 U.S. Navy와 Buhlman의 공기 감압 테이블보다 더 보수적이기 때문이다. 아마추어와 프로는 물론이고 수십 개 대학의 수많은 과학자들도 수십만 번의 EANx 다이빙을 안전하게 실시하고 있다.

2.2 나이트록스 잠수의 특성

2.2.1 나이트록스의 장점

감압은 잠수하는 동안 체내에 흡수된 질소의 양에 따라 그 절차가 달라진다. 질소의 흡수율과 체내에 흡수된 전체 질소량은 호흡 기체의 질소 부분압에 의해 결정된다. 따라서 호흡 기체 속에 신진대사 작용에 소모되는 산소를 더 많이 넣어 질소를 희석하면 질소의 흡수율은 그 만큼 감소할 것이다. 다이버 테이블과 다이버컴퓨터에 사용되고 있는 수학적 모델들은 호흡매체 속의 질소량에 근거하여 질소 흡수곡선을 가정한다. Fig. 3은 수심 20 m의 경우 모델들에 사용되고 있는 질소 흡수곡선이다(Rutkowski, 1994).

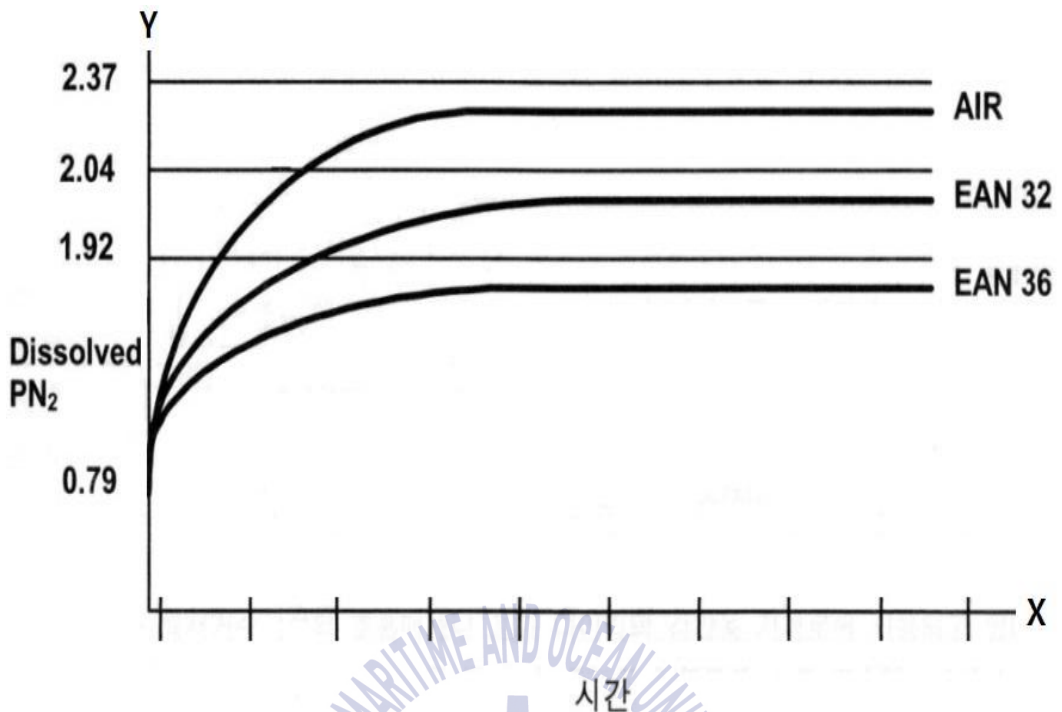


Fig. 3 Dissolved nitrogen curve(Rutkowski, 1994)

잠수사가 호흡 기체로 산소의 함량이 21%인 공기를 사용할 때 잠수사의 초기 체내 질소량은 0.79%에서 잠수 시간이 지남에 따라 약 2.37%까지 증가하는 것을 알 수 있다. 호흡 기체로 EAN32를 사용하면 잠수사의 초기 체내 질소량은 0.79%로 공기와 같지만, 잠수 시간이 지날수록 호흡 기체의 질소량이 공기보다 적어 잠수사의 체내 질소량은 최대 2.04% 이하로 유지됨을 알 수 있다. EAN36의 경우에도 시간이 지남에 따라 체내 질소량은 최대 1.92% 이하로 유지된다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 호흡 기체 속의 질소량이 작으면 잠수 중 체내에 흡수되는 질소량도 항상 작게 된다. 즉 호흡하는 혼합기체 중에 질소의 양을 줄이면 산소의 양은 증가하고, 주어진 수심에서의 무감압한계 시간은 더 길어지며, 감압이 요구될 때 감압 시간은 짧아진다. 잠수를 계속할 경우, 체내에 남아있는 잔류 질소량은 작게 된다. 잔류 질소량이 작게 된다는 것은 반복 잠수 시 수면 휴식시간이 단축되고 반복 잠수 시간이 연장된다. 몇몇 기관에서는 잠수사가 나이트록스를 사용해서 잠수한 후 피로감이 적어지는 것에 대해

감압의 스트레스가 작아졌기 때문이라고 말하고 있다. 또한 잠수에 따른 잠수사의 체내 조직에 남아있는 질소가 작으므로 잠수 후 고지대로 올라갔을 때의 위험성도 감소한다.

2.2.2 산소 독성

산소는 우리 환경에서 생명을 유지하는데 절대적으로 필요한 중요한 요소인데, 이 사실은 1774년 Joseph Priestley에 의해 처음 확인되었다. 공기의 약 21%를 차지하고 있으며, 가연성 물질은 아니지만 연소를 하는데 필요하다. 화학적으로 보통은 2개의 산소 원자로 구성된 이원자 분자 상태로 존재한다. 요즘 대기 중의 산소 비율은 20%를 약간 상회하지만 과거에는 이 비율이 훨씬 낮았던 것으로 추측되고 있다. 이 사실로부터 우리는 다이빙에 가장 적합한 산소 비율이 인간의 진화에 따른 비율과 다를 수도 있다는 생각을 하게 된다. 실은 육상에서도 현재의 산소 비율이 우리 인간에게 가장 적합하지 않을지도 모른다. NOAA의 Morgan Wells 박사는 “스쿠버 다이빙에 20%의 산소가 가장 이상적이지는 않은 것 같다.” 라고 말하고 있다(Voss, 2003).

1878년에 Paul Bert는 동물을 이용한 실험에서 1기압 하에서 산소를 흡입하면 폐 산소 독성의 증상을 완화할 수 있음을 밝혀냈다. 이 실험 이후 산소는 감압병에 대한 응급처치의 기체로 중요한 가치를 갖게 되었다(Acott, 1999).

잠수사가 100% 산소를 호흡하면 체내의 질소를 좀 더 빠르게 제거할 수 있으며, 체내에 생성된 기포의 크기도 빠르게 작아진다. 잠수사가 산소를 호흡할 때 폐안의 질소가 산소로 대체되고 혈액 내의 질소는 기체의 압력 차이로 인해 폐로 확산하여 혈액 내의 질소 부분압이 낮아진다. 혈액 내의 질소 압력이 조직 내의 압력보다 낮으면 질소 및 기포는 조직에서 혈액으로 확산하고, 확산한 기체는 혈관을 타고 이동하여 폐포에서 기체교환을 통해 신체 외부로 배출되며, 조직, 혈액, 폐의 압력 차이가 순차적으로 동일해질 때까지 반복된다. 산소는 또한 감압병, 일산화탄소 중독과 익수 등을 경험한 잠수사들의 의학적 치료에 기본적인 기체이다(Lippmann, 1992).

높은 부분압의 산소는 잠복기(latent period)보다 짧은 시간을 흡입하면 인체에 아무런 영향이 나타나지 않지만, 오랫동안 흡입할 경우 산소 독성이 나타난

다. 높은 부분압의 산소는 거의 모든 조직에 영향을 미칠 수 있으므로, 산소 독성의 양상은 다양하다. Lorraine Smith 효과로 알려진 폐 산소 독성(pulmonary toxicity)과 Paul Bert 효과로 알려진 중추신경계 산소 독성이 가장 현저하다. 눈의 감각신경 조직에도 손상을 주며 적혈구도 파괴한다. 이러한 산소 독성은 흡입 산소의 부분압이 증가하거나 노출 시간이 연장되면 심해지며, 개인차 또한 크다(해양의료원, 2002).

Fig. 4는 ppO_2 를 변화시켰을 때 폐와 뇌에 독성이 나타나는 시간을 예상한 것이다. 산소 독성의 위험은 ppO_2 의 증가와 함께 증가하고 ppO_2 가 증가함에 따라 보다 강하고 빠르게 효과를 나타낸다(Edmonds, et al., 2013).

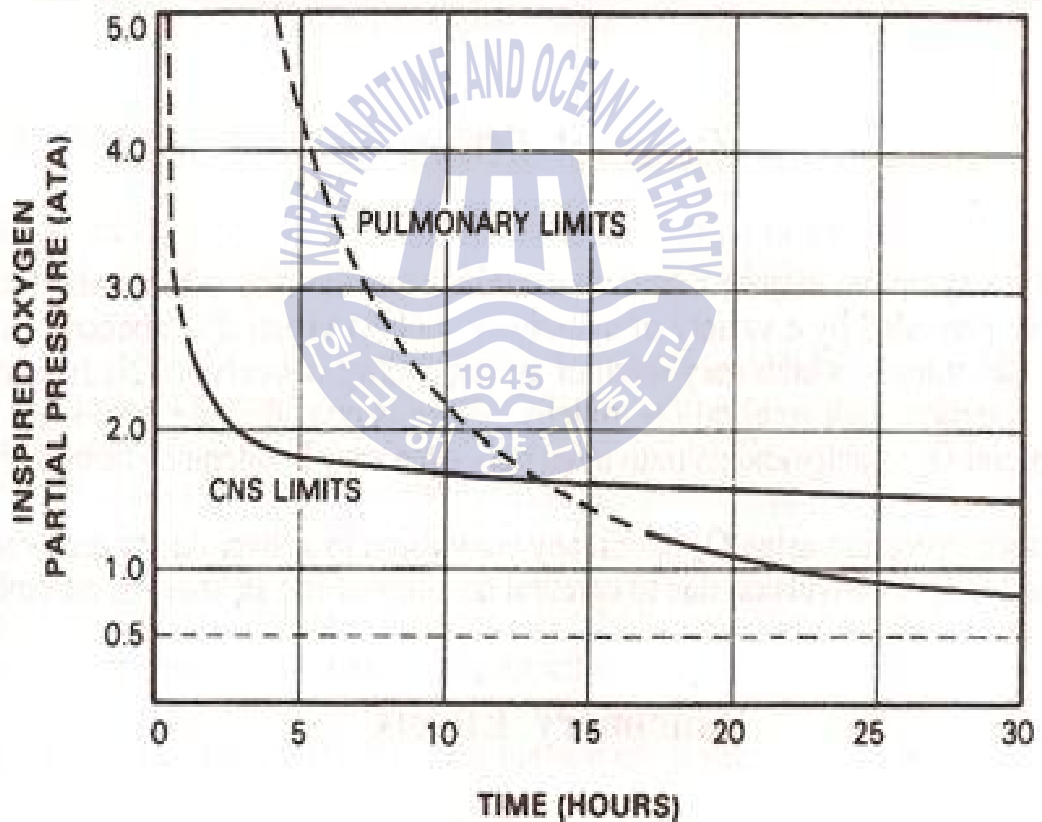


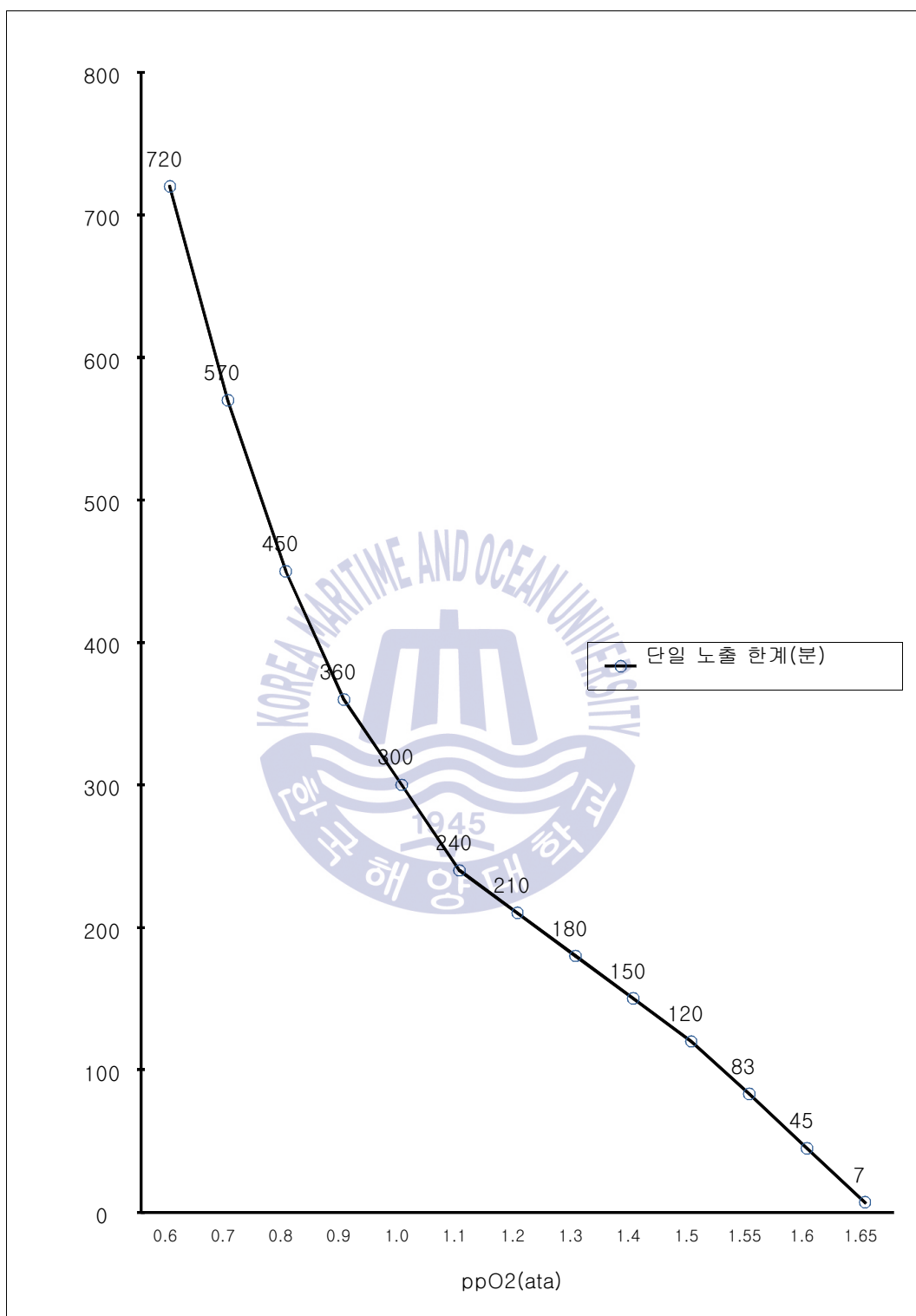
Fig. 4 Predicted pulmonary and cerebral toxicity limits of exposure to varying partial pressures of oxygen(Edmonds, et al., 2013)

산소 독성을 예방하기 위해서는 ppO_2 의 한계를 알고 있는 것이 매우 중요하다. USN 잠수 교본에는 혼합기체를 사용한 수중 작업시의 ppO_2 한계를 설정해 놓았고, 그 범위는 상당히 보수적이다. 최근에는 감압을 포함한 잠수의 전 과정에서 산소 노출량을 계산하고 이것을 이용하여 UPTD 라는 것을 사용하기도 한다. 1 UPTD는 100% 산소를 1기압에서 1분 동안 호흡함으로써 일어나는 폐 산소 중독의 정도를 말한다.

산소를 감압에 사용하면 확실한 이점이 있지만 잠수사가 중추신경계 산소 독성에 노출될 확률이 증가한다. 만일 1.0의 ppO_2 에서 30분간 잠수를 한다면 1회 잠수의 노출 한계치 300분의 10%를 사용하게 된다. 연속해서 1.6의 ppO_2 에서 15분간의 반복 잠수를 한다면 1.6에서의 단일 노출 한계치 45분의 33%를 사용한 것이 된다. 위의 두 번의 잠수에서 잠수사는 43%의 %CNS를 갖게 된다 (Joiner, 2001).

잠수하는 동안에 %CNS는 절대 줄어들지 않는다. 잠수를 끝내고 수면에 도착하면 90분 반감기에 의해 %CNS는 제거된다. 만일 잠수 종료 후 %CNS가 80% 이었다면, 90분 후 40%로 감소하고 또다시 90분 후 20%로 감소한다. 이런 식으로 모두 90분 반감기가 6회 반복된 후에 %CNS는 0%가 된다.

NOAA의 산소 노출 한계치는 0.6-1.60까지의 ppO_2 범위에서 노출 한계 시간만을 나타낸다. Fig. 5는 NOAA의 산소 노출 한계치에 선형 보간법(linear interpolate)을 적용한 그래프이다. ppO_2 1.65에서의 노출 한계치는 추론하여 적용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 ppO_2 가 1.60을 지나면 노출 한계치는 급격하게 줄어들고 ppO_2 가 1.65를 지나면 그 속도는 더욱 빨라진다(Coen, 2015).



2.2.3 최적기체와 ppO_2

나이트록스 기체를 사용하는 잠수에서 작업시간을 최대로 조정할 수 있는 산소비율을 알 필요가 있으며, 이를 최적기체라고 한다. 혼합기체 속에 불활성기체의 비율이 낮을수록, 산소의 비율이 높을수록 잠수 시간이 길어진다. 다음은 최적기체를 구하는 식(1)이다.

$$F_g = \frac{P_g}{P} \text{ 혹은 최적기체 } FO_2 = \frac{ppO_2}{P} \quad (1)$$

P_g 혹은 ppO_2 = 기체의 부분압 혹은 산소의 부분압

P = 혼합기체의 총압력

F_g = 기체의 백분율

예를 들어, 29 m에서 60분간 잠수 계획을 수립할 때 산소 독성에 걸리지 않으면서 감압 시간을 최대로 줄일 수 있는 혼합기체를 결정하기 위해 위의 식(1)을 사용하면, ppO_2 는 1.4로 가정하고 29 m에서의 압력 P 는 3.9이므로 계산에 의해 최적 혼합은 0.36으로 나온다. 여기서 0.36은 선택된 혼합기체의 산소비율을 나타내며 36%의 산소를 포함하는 나이트록스를 사용할 수 있다.

ppO_2 의 허용한계는 각 잠수 단체에 따라 조금씩 규정이 다르지만 일반적으로 작업시간, 잠수의 종류 및 목적에 따라 1.2-1.8의 수치로 결정된다. 근래에 ppO_2 의 허용한계는 점차 낮아져 민간 산업 잠수 협회인 IMCA와 영국의 HSE(health and safety executive)가 ppO_2 의 한계치를 1.4로 낮추었다(IMCA, 2014b). 또한 USN의 개정판 잠수 교본에서도 ppO_2 의 허용한계를 1.4로 제한하였다(Naval Sea System Command, 2008). 본 논문에서도 위의 기준을 따라 ppO_2 의 허용한계를 1.4로 맞추어 연구를 진행하였다. Table 1은 ppO_2 가 1.4일 때 수심 12-51 m 사이의 최적기체이다.

Table 1 Best mix

수심 (m)	최적기체 (best mix)
12 m	EAN63
15 m	EAN56
18 m	EAN50
21 m	EAN45
24 m	EAN41
27 m	EAN38
30 m	EAN35
33 m	EAN33
36 m	EAN30
39 m	EAN29
42 m	EAN27
45 m	EAN26
48 m	EAN24
51 m	EAN23

Table 2는 NOAA의 산소 노출 한계치이다. ppO_2 가 높아질수록 노출 한계 시간은 점점 줄어든다. 정상적인 상태에서 1.6의 ppO_2 에서 잠수하면 단일 노출 한계는 45분이다. 여기서 정상적인 상태란 취미활동, 연구, 표본 채취, 검사, 관찰, 수리 등 가벼운 활동을 하는 경우를 의미한다. 물론 단일 잠수시의 허용 한계시간을 초과하지 않는 한도 내에서는 몇 번의 반복 잠수를 해도 무방하다. 만일 24시간 동안 단일 잠수시의 허용시간을 초과하게 되면 그 잠수사는 반복 잠수를 하기 전에 적어도 2시간 동안은 공기로 호흡해야 한다. 그리고 24시간 동안 총 호흡 시간이 1일 허용한계를 초과하면 적어도 12시간 이상 공기로 호흡한 후에 잠수를 재개하여야 한다.

Table 2 NOAA oxygen exposure limits(Joiner, 2001)

ppO_2 (ATA/Bar)	단일 노출 한계 -1회 잠수 제한	1일 노출 한계 -24시간 잠수 제한
0.60	720분	720분
0.70	570분	570분
0.80	450분	450분
0.90	360분	360분
1.00	300분	300분
1.10	240분	270분
1.20	210분	240분
1.25	195분	225분
1.30	180분	210분
1.35	165분	195분
1.40	150분	180분
1.45	135분	180분
1.50	120분	180분
1.55	83분	165분
1.60	45분	150분

2.2.4 MOD와 EAD

나이트록스 잠수에서 호흡 기체의 MOD는 ppO_2 의 허용한계에 의해 결정된다. MOD는 특히 호흡 기체로 나이트록스나 트라이믹스를 사용하는 잠수에서 잠수사의 산소 독성을 최소화하기 위한 잠수 계획 수립 시 반드시 고려되어야 한다.

MOD는 다음의 식(2)로 구할 수 있다.

$$MOD(m) = 10m \times \left[\left(\frac{ppO_2}{FO_2} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

ppO_2 = 산소의 부분압

FO_2 = 산소의 비율

예를 들어 40%의 나이트록스를 사용하고 ppO_2 을 1.4로 할 경우 식(2)에 ppO_2 1.4 와 FO_2 0.4를 입력하면 25.0이다. $MOD(m) = 10 \times \left[\left(\frac{1.4}{0.4} \right) - 1 \right] = 25.0$ 즉, ppO_2 가 1.4일 때 EAN40을 사용하여 잠수할 수 있는 최대 수심은 25.0 m이다.

나이트록스를 사용할 때의 감압 절차는 공기환산수심, EAD 혹은 질소전환수심, END(Equivalent Nitrogen Depth)의 개념에 근거하고 있다. 이 절차의 기본 개념은 특정 수심에서 나이트록스를 사용할 때의 질소압력이 공기를 사용할 때의 질소압력과 같게 되는 수심을 구해서 그 수심에서의 감압절차를 따른다는 것이다. 이 절차는 지난 30년간 반폐쇄회로 및 폐쇄식 혼합 기체용 수중호흡기에 사용되어 왔다(Rutkowski, 1994).

EAD는 다음의 식(3)으로 구할 수 있다.

$$EAD(msw) = (FN_2)(D + 10)/0.79 - 10 \quad (3)$$

FN_2 = 질소의 비율(소수점표기)

0.79 = 공기 중 질소의 비율

D = 수심(msw)

2.3 나이트록스 시스템 구성

2.3.1 산소청결

산업 잠수사들과 과학자들은 산소의 비율을 높인 혼합기체를 수 년 전부터 사용하여 왔다. 이들 혼합기체를 사용하는 실린더는 고농도의 산소에 접하게 되는 위험성 때문에 특별한 주의가 요구되고 있다.

산소비율이 21% 이상인 기체에 대해 매우 중요함에도 불구하고 잘 인식되고 있지 않는 점이 화재의 위험성이다. 화재의 위험 정도는 온도, 압력, 배관 내에서의 충격, 재질 등 여러 요인에 따라 다르다. 미리 혼합된 상태의 나이트록스를 승압시켜 충전시키는 NOAA 방식은 저압의 순산소를 사용하는 방식보다 화재의 위험이 훨씬 적다.

미국의 OSHA(Occupational Safety and Health Administration) 규정 29CFR 1910.430 (i)항에 의하면 산소비율 40% 이상의 기체를 취급하는 실린더는 산소청결(oxygen clean) 처리를 하도록 되어있다. 산소청결은 어떤 상태라고 정확히 한마디로 규정을 짓기 어렵다. CGA(Compressed Gas Association)는 G-4.1 지침서 Part 11.26에 산소청결에 대한 경계를 오염 물질의 수준으로 묘사하고 있는데, “탄화수소(hydrocarbon)나 이물질들의 양이 구매자들이 지정한 한계치를 초과하지 않아야 한다. 산소청결에 대한 기준은 사용용도 및 상태(유체의 상태, 온도, 압력)에 따라 약간씩 다르지만 대개는 오염 물질이 47.5 mg/ft^2 (500 mg/m^2)보다 많지 않은 상태를 말한다.” 라고 명시되어있다. 그리고 만일 강력한 백색 등을 비취 탄화수소나 먼지들이 보이면 산소청결이라 할 수 없다(High, 2001).

부분압 방식을 이용한 혼합(partial pressure blending)으로 나이트록스를 충전한다면 고농도의 산소에 노출될 수 있으므로 산소청결을 필수적으로 해야 한다. 산소청결은 실린더와 실린더 밸브의 그리스(silicone-grease)나 윤활제 등의 오염물질과 고농도의 산소에서 자연발화를 일으키는 탄화수소를 제거하고 오-링은 산소 호환성 오-링으로 교체하고 산소 호환 윤활제를 사용한다.

IMCA에서는 산소비율이 25% 이상의 혼합기체를 사용하는 장비는 산소청결

을 실시해야 하며 휘발성 솔벤트(volatile solvent)와 수용성 세척액(aqueous based detergent)을 사용하는 방법을 제시한다(IMCA, 2003a).

산소청결 작업이 끝나면 “산소청결(oxygen-cleaned)”이라고 표시된 별도의 스티커를 실린더 또는 실린더 쿼드(quads)에 부착하고, 시행 일자와 책임자의 확인 서명을 한 후 마개를 덮거나 플러그를 설치해 추가 오염을 방지한다.

Fig. 6은 오프쇼어 현장에서 사용하는 검사증명 실린더 라벨 스티커이다. 실린더 라벨에는 마름모꼴 모양의 위험 물질 표시 기호와 UN 코드, 제품의 명칭 및 주의사항과 위험성에 대한 내용 등이 포함된다. 영국 BCGA(British Compressed Gases Association)의 기술 자료에 상세한 내용을 확인할 수 있다 (BCGA, 2012).



Fig. 6 Labeling of cylinder(BCGA, 2012)

2.3.2 나이트록스의 혼합

나이트록스 기체를 제작하기 위해서는 크게 산소를 첨가하는 방법(oxygen addition)과 질소를 제거하는 방법(nitrogen removal)으로 구분할 수 있다. 산소를 첨가하는 방법은 다시 중량 사용 방식(mixing by weight)과 부분압 사용 방식(partial pressure mixing), 연속 혼합 방식(continuous flow mixing)으로 나누어진다. 질소를 제거하는 방법은 압력차를 이용해 고체에 흡착되는 기체의 양이 달라지는 현상을 이용하여 혼합물을 분리하는 PSA(Pressure Swing Adsorption) 방식과 멤브레인 분리(membrane separation) 방식으로 나누어진다.

중량 사용 방식은 각 기체 분자의 정확한 중량을 계측하여 필요한 질량만큼 혼합하는 방법으로 혼합한 후에는 6시간 정도 대기하는데, 이때 분자의 자연스

러운 이동으로 인한 균질화(homogenize)가 이루어진다. 온도의 영향을 받지 않고 기체의 비이상적 행동으로 야기되는 문제 없이 가장 정확한 비율의 혼합 기체를 얻을 수 있지만 주로 동일한 비율로 대량의 나이트록스를 제작하는데 사용된다.

다음으로 부분압을 이용하는 방식이다. 부분압을 이용한 나이트록스 혼합방식은 초기 비용이 적지만 기체를 혼합하는 시간이 길고, 40% 이상의 비율을 갖는 산소를 사용하므로 모든 장비에 산소 청결이 필요하다. 또한 고압의 산소를 취급하는데 따른 잠재적인 위험이 있다. Fig. 7은 2중 여과 방식을 사용한 시스템이다.

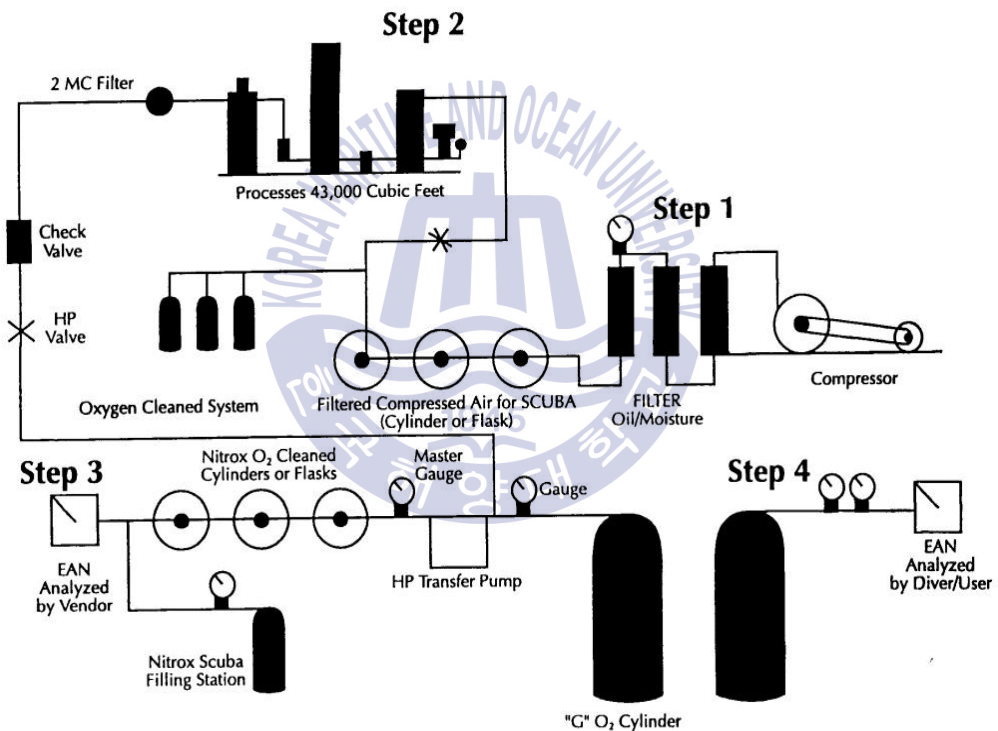


Fig. 7 Nitrox double filtration partial pressure mixing system
(Bjorkman, 2007)

2중 여과 방식을 사용하여 나이트록스를 제작하려면 먼저 혼합 테이블 또는 수학적 계산식으로 결정된 정확한 산소의 압력 양만큼 충전한 후 산소와 혼합 가능한 공기를 추가한다. 압축기에서 압축된 공기는 Fig. 7의 1, 2단계를 거

치며 산소와 혼합 가능한 공기로 만들어지며, 3단계에서 산소와 혼합되어 나이트록스 기체가 생산된다. 더욱 효과적인 혼합을 위해 캐스케이드 방식(cascade fill)과 오일-프리 압축기(oil-free compressor), 부스트 펌프(boost pump)가 사용된다.

연속 혼합 방식은 혼합기체를 압축하기 전에 공기와 저압의 산소를 혼합하는 방법이다. Fig. 8은 1989년에 Morgan Wells 박사가 개발한 연속 나이트록스 혼합장치(continuous nitrox mixer)이다. 기체 혼합 코일(gas mixing coil) 이후의 시스템에는 산소 청결이 필요하며, 오일-프리 압축기(oil-free compressor)가 요구된다. 가장 사용하기 편리한 기체 혼합 장비 중의 하나로 알려져 있다(Joiner, 2001).

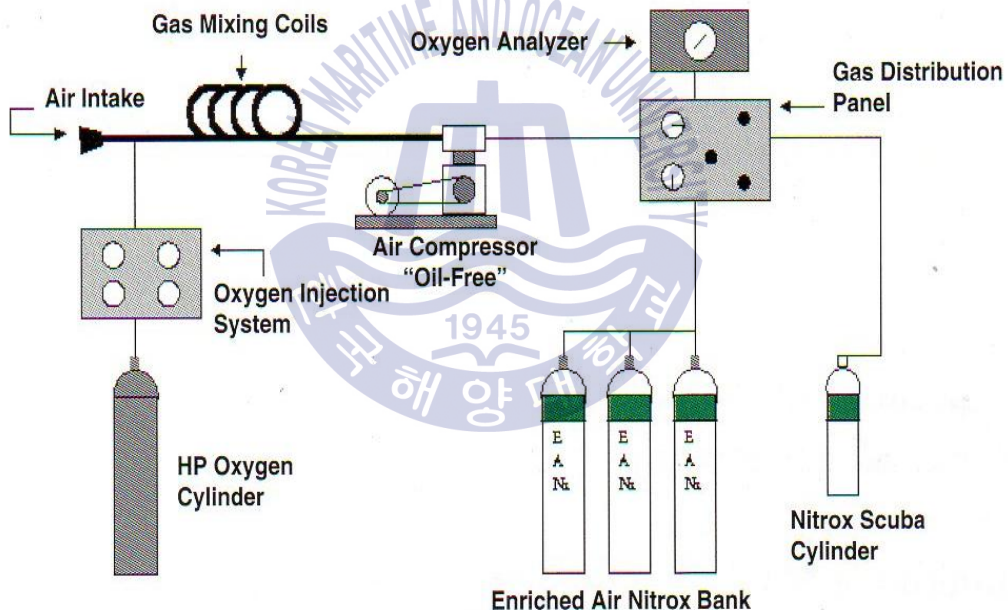


Fig. 8 NOAA continuous nitrox mixer(Joiner, 2001)

연속 혼합 방식을 이용한 다른 장비로는 캐나다의 발명가인 Ross Cowell이 개발한 나이트록스 스틱(LlewocSIS Nitrox Stik) 연속 혼합장치가 있다. Ross Cowell은 압축기를 통과하기 전에 공기와 산소가 완전히 균일하게 혼합되고 산소의 함량이 40% 이하로 유지된다면 산소 청결의 과정을 생략해도 된다는 것

을 발견하였다. 따라서 이 장치를 일반 공기 압축기에 연결하기만 하면 누구나 쉽게 안전하고 정확한 비율로 최대 40% 비율을 갖는 나이트록스 기체를 혼합할 수 있다(Bjorkman, 2007). Fig. 9는 Ross Cowell의 나이트록스 스틱 개념도이다.

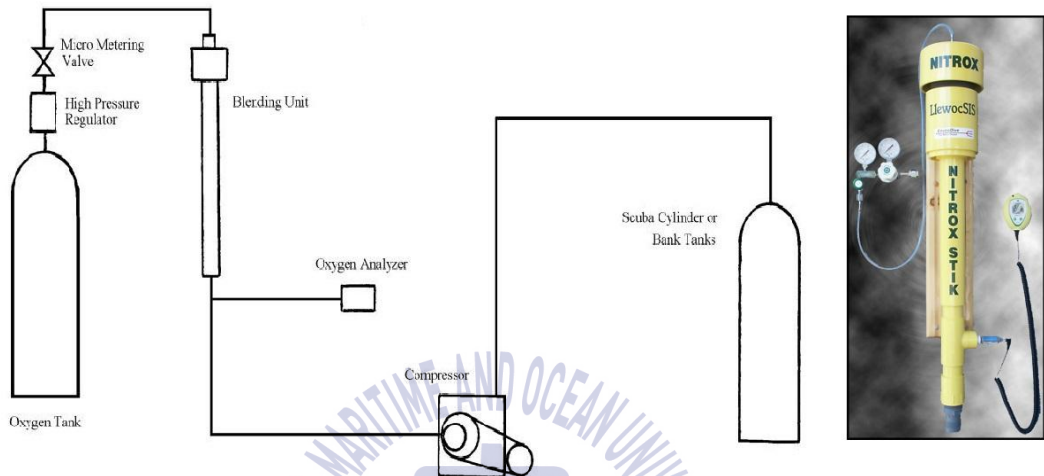


Fig. 9 LlewocSIS nitrox stick continuous gas blender(Bjorkman, 2007)

이상과 같이 연속 혼합 방식은 저압 하에서 공기와 산소가 혼합되므로 좀 더 안전하고, 장비의 소형화가 가능하며, 균일한 혼합을 위한 분자 간의 이동을 위한 대기시간이 필요 없다. 또한 기체를 혼합하는 동안 지속해서 기체의 분석이 가능하다.

다음은 질소를 제거하는 방법이다. 기술적으로 PSA 혼합방식은 나이트록스를 혼합하는 장비로 볼 수는 없지만 최대 95% 함량의 산소를 생산할 수 있다. 이 방식은 흡착제의 한 종류인 분자체(molecular sieve)를 이용한다. 분자체는 결정 내에 수많은 크기의 공동을 가지며 공동의 통로를 통과한 분자만이 공동에 흡착된다. 질소가 산소보다 쉽게 흡착되므로 압축된 공기가 분자체를 통과하면 산소의 함량이 높아진다. PSA 혼합방식을 통한 산소의 생성과정에서 아르곤도 대기 중 공기와 같은 비율로 생성되지만 잠수사에게 영향을 미칠 만큼의 농도는 아니다. 이 방식은 혼합기체 제작을 위해 고압의 산소가 필요 없으며 생성된 산소 혼합물은 연속 혼합 방식과 결합하여 사용할 수 있다.

Fig. 10은 PSA 혼합 방식으로 산소를 생성하는 과정이다.

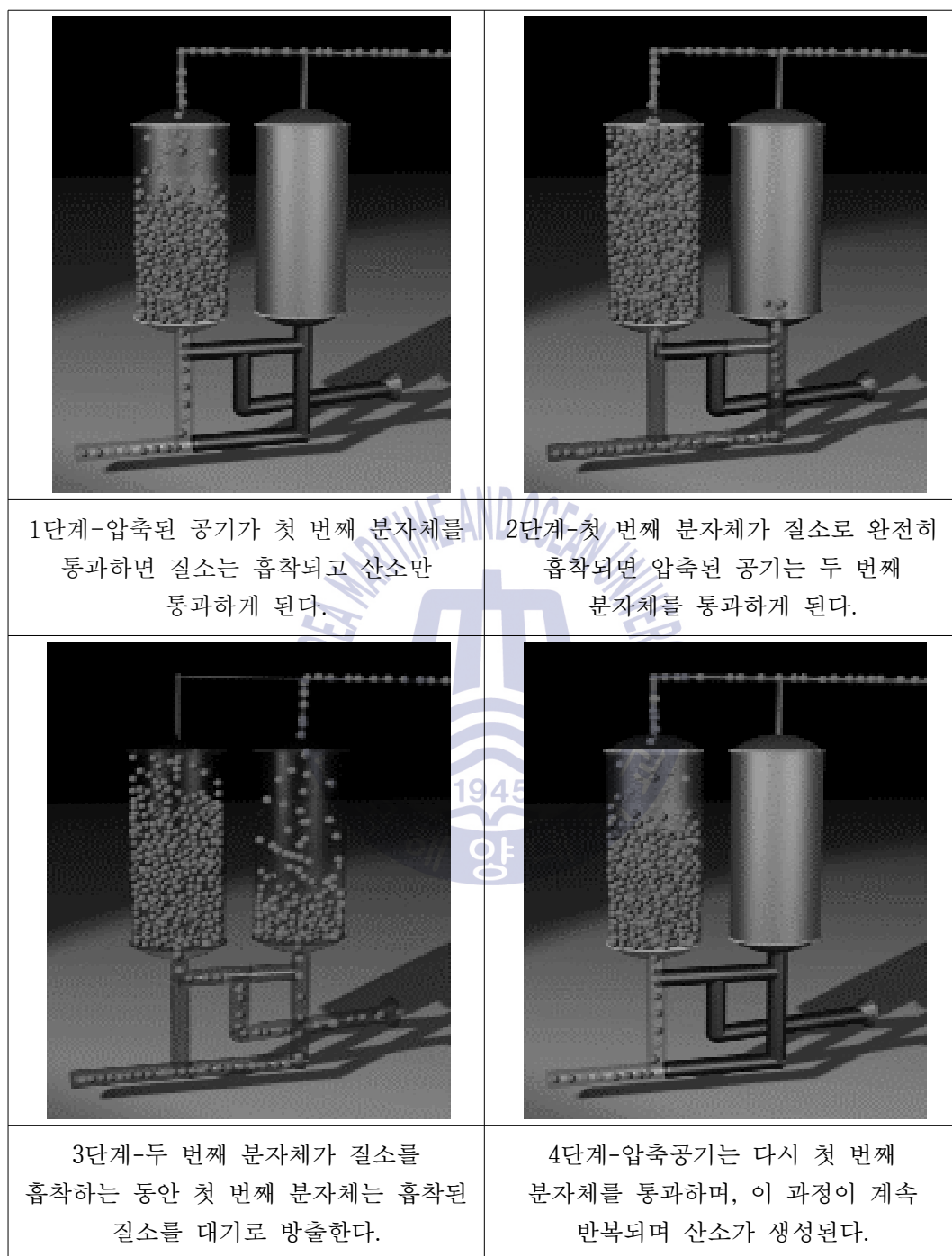


Fig. 10 PSA system(Oxygen generating systems Intl, 2015)

마지막으로 멤브레인 분리 방식은 반투막(semi-permeable membrane)을 통과한 확산(diffusion), 즉 삼투(osmosis)의 원리를 이용한다. 멤브레인은 수천 개의 가느다란 튜브로 구성된 파이프 형태로 이곳에 저압의 공기를 통과시키면 공기 내의 산소와 질소는 각기 다른 용질의 크기와 특성으로 인해 반투막 튜브에서 분리되어 걸러진다. **Fig. 11**은 반투막 멤브레인의 개념도이다. 이 방식은 입력되는 압축공기량을 조절하여 원하는 산소의 농도를 얻을 수 있으며 최대 50%의 산소를 포함하는 나이트록스를 얻을 수 있다. 멤브레인 분리 방식은 헬륨이나 그 밖의 기체를 추출하는데도 사용된다.

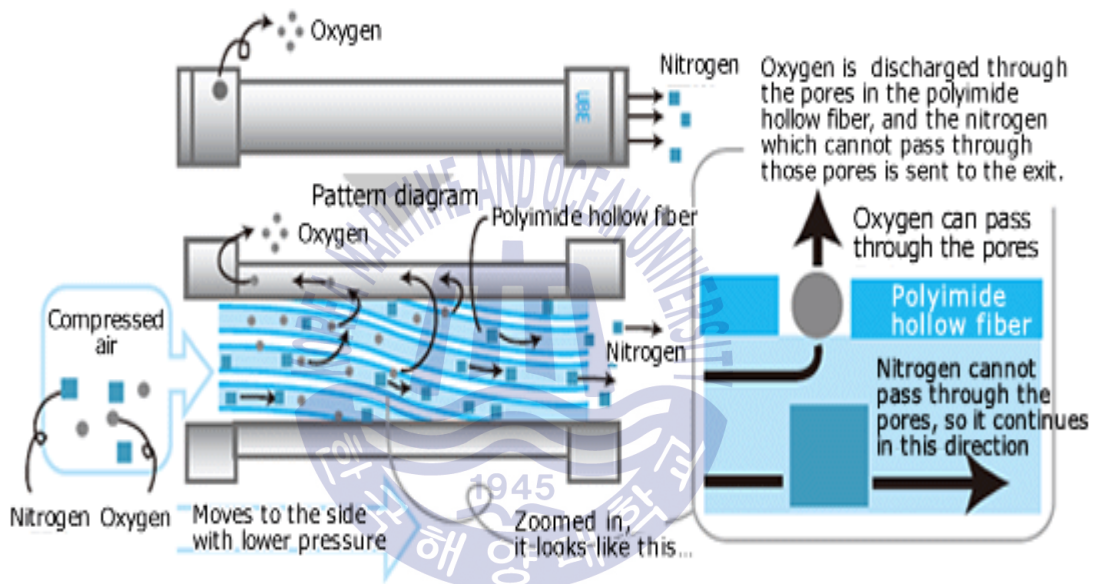


Fig. 11 Separation membrane mechanism(Nitrotech, 2015)

멤브레인 분리 방식은 PSA 혼합 방식과 같이 고압의 산소가 필요 없으며 연속 혼합 방식과 결합하여 사용할 수 있다. **Fig. 12**는 Undersea Breathing System사의 DNAX 시스템이다. DNAX 시스템의 장점은 추가로 고압의 산소 공급 없이 나이트록스 제작이 가능하며, 산소 청결이 필요 없고 기체 혼합 교육을 받을 필요도 없다. 장비가 간소하고 정확한 비율의 혼합이 가능하다.

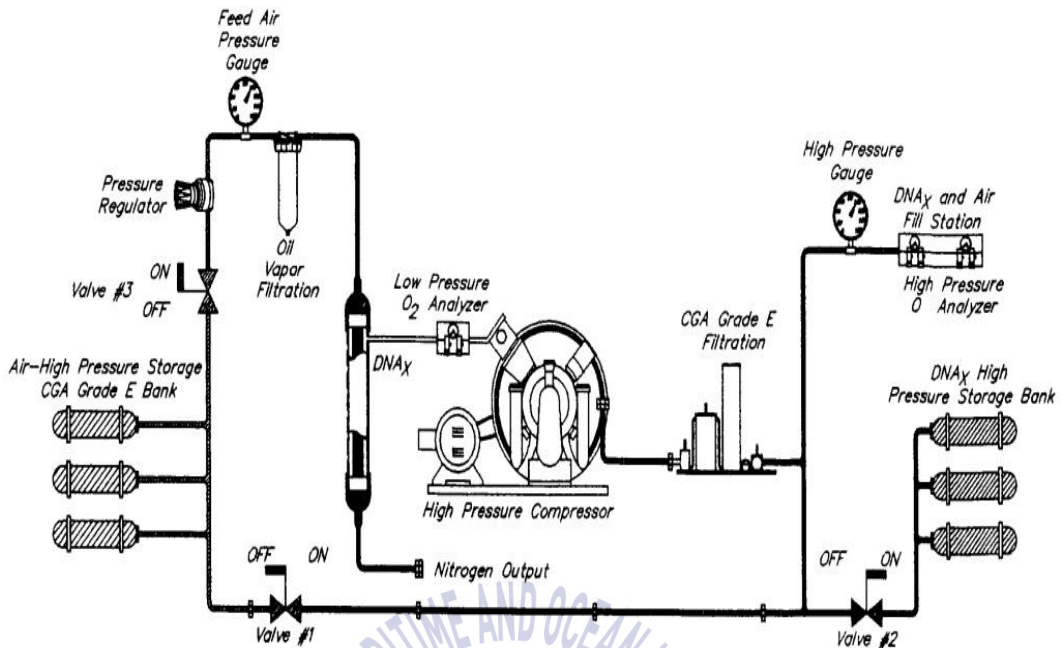


Fig. 12 DeNitrogenated Air system(Bjorkman, 2007)

2.3.3 나이트록스의 분석

산소 분석기는 나이트록스 시스템에서 가장 중요한 장비 중 하나이다. 잠수 감독관은 작업 전 반드시 나이트록스 기체를 분석해 얼마만큼의 산소를 포함한 나이트록스를 사용하는지 알고 있어야 한다.

산소 분석기는 다양한 형태와 종류가 있지만 크게 디지털식과 아날로그식이 있으며, 검출 방식에 따라 자기 산소 분석기(paramagnetic analyzer)와 전기 화학식 산소 분석기(electrochemical analyzer)로 나눌 수 있다. 전기 화학식 산소 분석기는 산소를 이온과 전자로 분리하여 생성된 전류를 측정한다.

대부분의 나이트록스 제조자는 사용자가 충전 후 반드시 산소 함량을 측정하고, 데이터를 기록할 것을 요구한다. 나이트록스의 측정치는 나이트록스 테이블에 명시된 수치의 1%의 범위에 유지되어야 한다. 함량이 높으면 산소 중독의 위험성을 고려하여 다시 조정해야 하며, 함량이 낮다면 감압병의 위험을 고려하여 다시 조정해야 한다.

산소 분석기는 측정 시마다 보정을 해야 한다. 보정을 위해서는 공기 중에서 분석기를 작동시켜 최소 1분 이상 지나서 표시 값이 안정되도록 한다. 표시 값이 20-21%가 아니라면 다시 보정을 해야 한다. 표준 값으로 보정되지 않는다면 그 분석기를 수리해야 한다.

센서는 2개의 전극으로 이루어져 있는데, 황 재질의 음극은 형광폴리머 막을 통해 공기 중에 노출되며 납 재질의 양극은 수산화칼륨 액에 잠겨 있다. 산소가 막을 통과하면 음극에서는 전 화학적인 산소의 감소가 검출되고 그 결과로 인한 양극의 산화 때문에 산소함량에 비례해서 전기가 발생하게 된다. 그 결과치는 온도 보정을 거친 뒤 모니터에 표시된다.

산소 분석기는 외부 충격 때문에 쉽게 파손될 수 있으며, 습기에도 주의해야 한다. 만약 습기가 멤브레인에 침투한다면 산소가 통과하는 길을 막게 되어 산소의 함량이 적게 표시된다. 종종 충전 시의 취급 부주의 등으로 인해 실린더 밸브 주위에 물이 남아있을 수 있는데 이것이 센서에 유입될 수도 있다.

센서 내부에는 열 감지기가 있어 온도 변화로 인한 영향을 줄일 수 있게 되어 있다. 그러나 온도 변화에 영향을 받게 되면 수리를 하거나 보정된 환경과 같은 조건에서 다시 사용해야 한다. 사용자는 보정 시나 일반 사용 시에도 조건을 잘 준수해야 하는데 자체의 열 발생으로 인해 내부의 열 감지기가 손상을 입어서 모니터에 잘못된 값이 측정되기도 한다.

2.3.4 나이트록스의 보관

나이트록스 기체를 보관하기 위해서는 기체 실린더와 쿼드(quad), 대량의 기체 저장용 실린더 뱅크(large gas storage banks) 등이 사용된다. 다음 Fig. 13은 나이트록스 실린더 뱅크와 50 L 용량의 실린더 16개가 같이 연결된 슈퍼 쿼드이다.



Fig. 13 Large gas storage banks

잠수 현장에서 사용하는 모든 실린더는 반드시 국제 기준에 맞는 표시를 해야 하며, 실린더의 목 또는 밸브 부근에 충전된 기체에 따라 별도의 색깔을 칠해 구별한다. 2가지 이상의 기체 혼합물의 경우 반드시 그에 맞는 2가지 이상의 색깔을 칠해 주어야 한다. Fig. 14는 실린더의 색깔을 표시하는 위치이다.

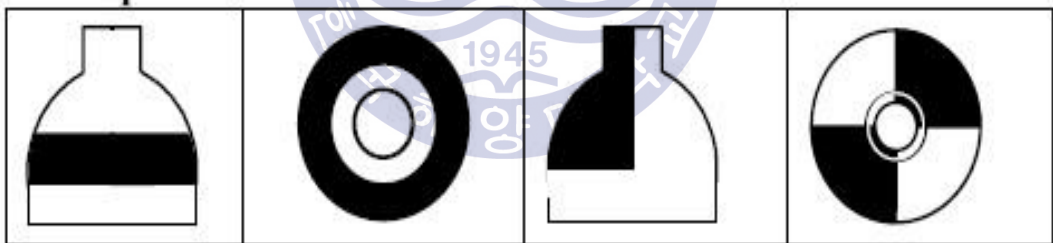


Fig. 14 Examples of bands and quadrants(BCGA, 2012)

산업 잠수 현장에서 사용하는 기체별 색깔은 다음과 같이 구분할 수 있으며, 색깔 표시는 밴드 형태 또는 4등분 형태로 칠할 수 있다. 의료용 산소의 경우 혼동을 방지하기 위해 전체를 흰색으로 유지한다. Table 3은 IMCA에서 권장하는 실린더의 색깔 표시이다. 잠수 현장에 필요한 기체별로 각기 다른 색깔로 표시하였다.

Table 3 Diving industry's commonly accepted colour coding(IMCA, 2007)

기 체	기 호	실린더 상부 색깔	실린더 상부	쿼드 상부/하부
헬륨	He		갈색	갈색
의료용 산소	O ₂		흰색	흰색
산소/헬륨 혼합물	O ₂ He		갈색, 흰색 $\frac{1}{4}$ 혹은 띠 모양	갈색과 흰색이 20cm 간격으로 교차되는 띠 모양
질소	N ₂		검정색	검정색
산소/헬륨/질소 혼합물	O ₂ /He/N ₂		검정색, 갈색, 흰색 $\frac{1}{4}$ 혹은 띠 모양	검정색, 갈색, 흰색이 20cm 간격으로 교차되는 띠 모양
공기 산소/질소 혼합물	Air N ₂ /O ₂		검정색, 흰색 $\frac{1}{4}$ 혹은 띠 모양	검정색과 흰색이 20cm 간격으로 교차되는 띠 모양
이산화탄소	CO ₂		회색	회색
캘리브레이션 가스 Calibration gas	상황에 맞게 선택		분홍	분홍

Fig. 15는 IMCA의 대용량 기체 저장을 위한 색깔 표시이다.

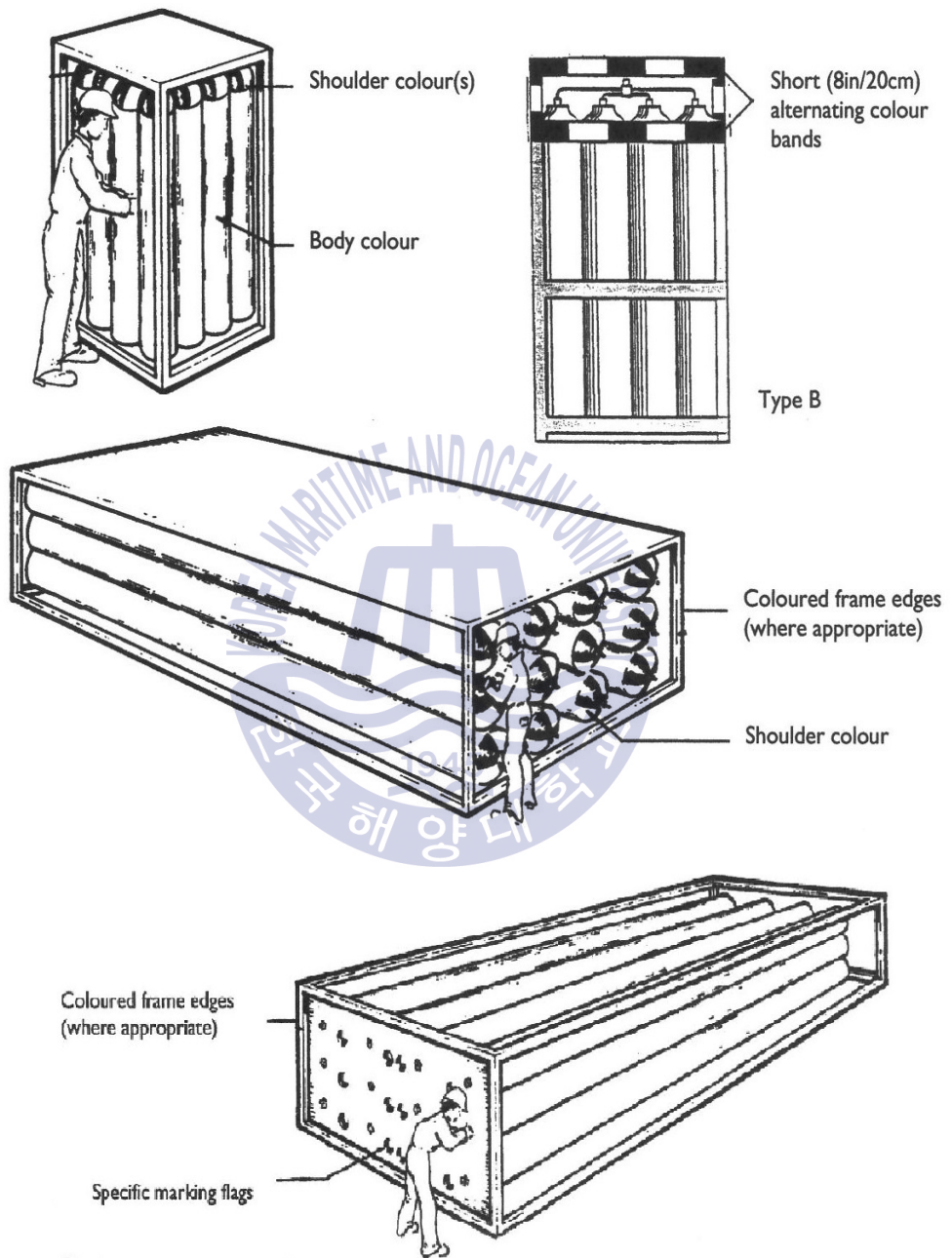


Fig. 15 Typical examples of quads and banks(IMCA, 2007)

2.4 수중 산소감압

수중에서 산소를 이용한 감압을 시행할 때 산소 독성의 위험성이 있으므로 100% 산소를 공급하는 최대 수심은 6 m로 제한해야 한다. 산소를 흡입 중에는 항상 2인 1조로 수중에 머물며 각자 서로의 스탠바이 잠수사의 임무를 수행해야 하며, 갑작스러운 산소 발작에 대비할 수 있어야 한다. 만일 1명의 잠수사만 산소감압이 필요하다더라도 반드시 스탠바이 잠수사가 주변에 대기하고 있어야 한다.

수중 산소감압을 위해서는 잠수 장비에 산소 세정의 과정이 필요하고 100% 산소와 호환 가능한 구성품을 사용해야 한다. 만일 추가로 산소 라인을 설치한다면 산소 호흡용 장비와 그에 따른 장비의 추가 구성이 필요하다. Fig. 16a는 산소감압을 위해 추가로 설치한 라인으로 웻벨 안의 잠수사에게 직접 산소를 공급해준다. Fig. 16b는 잠수사의 산소감압을 위해 설치한 BIBS(built in breathing system)이다. 잠수사는 잠수감독관의 지시에 따라 산소 밸브를 열고 BIBS를 이용해 산소감압을 실시한다.



(a) Oxygen system pipework



(b) BIBS

Fig. 16 Extra equipments for In-water decompression

침매터널 잠수작업에 사용한 산소감압의 절차는 다음과 같다. 잠수작업이 끝나면 잠수사는 웻벨로 이동하여 다이브 테이블에 따라 상승하며 주 호흡 기체

로 감압을 진행한다. 스탠바이 잠수사는 웨벨이 산소감압을 위한 정지 수심에 도달하기 전에 먼저 입수해 대기한다. 잠수사가 산소감압 수심에 도착하면 잠수감독관의 지시에 따라 잠수 헬멧을 벗고 BIBS를 착용한다. 잠수감독관은 잠수사가 감압을 위한 준비를 마치면 잠수사에게 100% 산소를 공급하며 감압을 시작한다. 웨벨 밖에서 대기하고 있는 스탠바이 잠수사는 웨벨에서 감압 중인 잠수사의 상태를 지속해서 관찰하며 응급상황에 대비하고 잠수감독관도 잠수조정실에서 웨벨 안의 카메라를 통해 잠수사를 관찰한다. Fig. 17에 웨벨 안에서 잠수사가 산소감압을 실시하고 있는 장면이 나와 있는데, 웨벨 뒤편으로 잠수사를 관찰하고 있는 스탠바이 잠수사가 보이고 있다.



Fig. 17 Diver using a BIBS which delivers oxygen
for In-water decompression

만일 산소감압 시간이 30분을 초과한 경우 산소의 공급을 중단하고 5분간 공기로 호흡을 하고 산소감압을 계속 진행한다. 잠수감독관은 수시로 웨벨 안의 산소 농도를 확인하여 산소 농도가 높아지면 환기(blow down) 밸브를 개방해

웨벨의 산소 농도를 적절하게 유지해야 한다. 수중에서의 산소감압이 끝나면 수면으로 상승한다. 산소감압을 위한 최소 구성 인원은 잠수감독관, 작업 잠수사, 스탠바이 잠수사와 수중에서 산소감압 중인 잠수사를 보조하기 위한 스탠바이 잠수사 등으로 구성되며, 일반적인 표면공급식 잠수작업보다 많은 인원이 필요하다. Fig. 18은 산소감압 종료 후 잠수사와 스탠바이 잠수사의 장비를 해제하는 모습이다.



Fig. 18 Tender helps to remove diver's gear after finishing In-water decompression

제 3 장 침매터널 잠수 자료 분류 및 분석

3.1 거가대교 침매터널 잠수 자료

거가대교는 부산광역시 강서구 천가동 가덕도와 경상남도 거제시 장목면 유평리를 연결하는 다리로, 가덕도-대죽도-중죽도-저도-유평리를 통과한다. 거가대교는 2004년 12월 착공하였으며, 2010년 12월 14일 개통되었다.

거가대교의 길이는 8.2 km로 왕복 4차선이며, 가덕도-대죽도(3.7 km)구간은 해저침매터널, 대죽도-중죽도-저도-거제 유평리(4.5 km) 구간은 사장교와 접속교, 육상터널로 구성되어 있다. 가덕도-대죽도 구간의 해저침매터널은 육상에서 제작된 터널구조물인 침매함체(Immersed tunnel)를 바닷속에 가라앉힌 후 각 침매함체를 연결하는 침매공법(沈埋工法)을 통해 만들었다.

침매함체는 모두 18개로 각각의 침매함체는 길이 180 m, 폭 26.5 m, 높이 9.75 m, 무게 45,000 ton에 이른다. 깊은 수심에서 거대한 함체들을 서로 연결하면서 4 cm 오차 범위 내에서 연결해야 하는 초정밀 시공을 위해 EPS(External Positioning System) 공법을 새롭게 시도했으며, 50년간 지역 해상기상 데이터를 기반으로 기상예보시스템을 적용해 함체를 이동한 뒤 바다에 가라앉혀 연결했다. 한국에서는 최초로 설치된 해저침매터널로, 세계 최초로 내해(內海)가 아니라 파도, 바람, 조류가 심한 외해(外海)에 건설되었다. 그리고 수심 48 m의 깊은 바닷속 연약지반에 건설됨으로써 세계에서 가장 수심이 깊은 곳에 건설된 해저침매터널이 되었다(두산백과, 2011).

침매함체는 경남 통영시 안정공단에 설치된 길이 500 m, 폭 200 m의 드라이독(dry dock) 내에서 제작되었다. 완성된 함체를 수면 위로 띄우기 위해 드라이독에 물을 채우는 동시에 함체 내부 밸러스트 탱크(ballast tank)에도 물을 채운다(Fig. 19). 드라이독에 물을 다 채운 뒤 배수펌프를 이용해 함체 내부 탱

크의 물을 빼내 중량을 줄이면 부력에 의해 함체가 수면 위로 뜬다.



Fig. 19 Concrete elements are closed in both ends with steel bulkheads and are designed to float with a small freeboard

드라이독을 출발한 함체는 12시간의 해상 운송을 통해 침설 작업이 진행될 부산 가덕도 해저터널 구간에 도착한다(Fig. 20).



Fig. 20 Elements are transported by the aid of tug boats to the position where they shall be immersed

Fig. 21은 경남 통영의 안전공단에서 출발한 함체가 해상 운송을 통해 가덕도의 작업 현장까지의 운송경로이다.

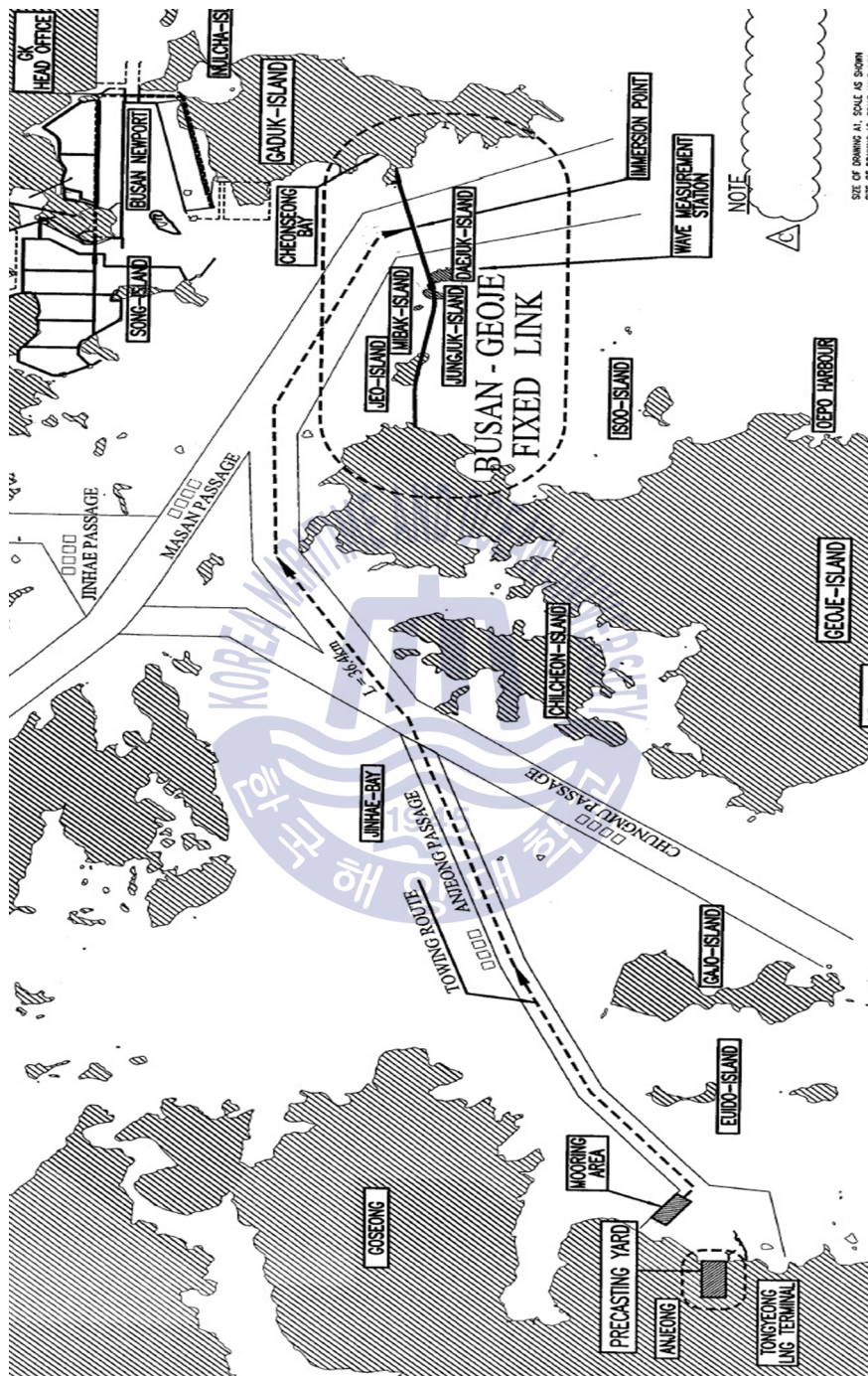
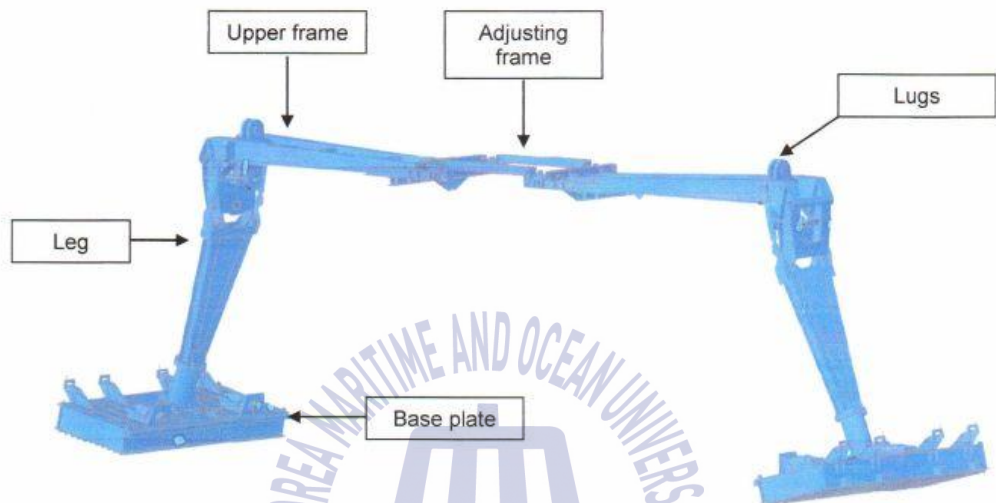


Fig. 21 Towing route from precasting yard to immersion point

현장으로 운송된 함체는 파도나 조류에 건디도록 바닷속에 설치된 여러 개의 앵커와 와이어로 연결한다. 이어 함체 내부 물탱크에 물을 채워 중량을 증가시키고 EPS를 통해 정확하게 가라앉힌다. Fig. 22에 EPS가 나와 있다.

The EPS exists of the following parts:



Type 2:

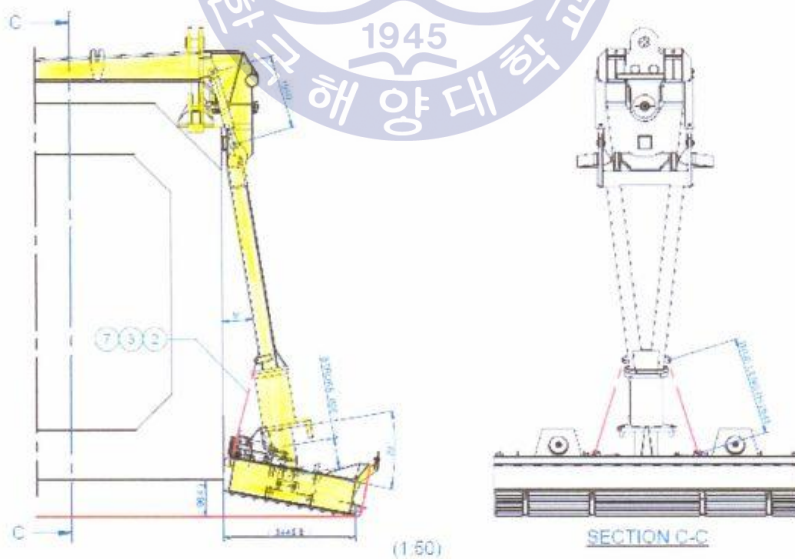


Fig. 22 External positioning system

Fig. 23은 함체의 침설 개념도이다. 함체는 먼저 설치한 함체의 접합면으로부터 50 cm 뒤에 가라앉힌다.

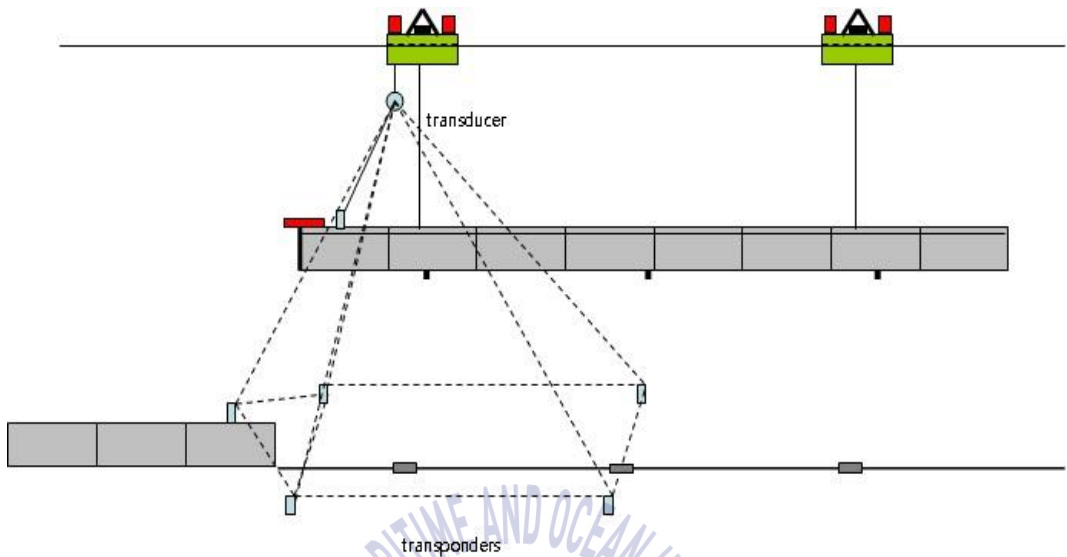


Fig. 23 Preparations before immersion

기존 함체 뒷부분과 연결될 함체 사이에 견인-잭(push-pull jack)과 서포트-빔(primary support beam)을 설치한다(Fig. 24).



Fig. 24 Push-pull jack and Primary support beam

연결 시 합체 중량으로 인한 기초 자갈 면과의 마찰력을 줄이기 위해 외부에 설치된 EPS로 합체를 살짝 든다. 마찰력이 줄어들면 견인 잭의 힘으로 두 합체가 접합 면으로 끌려오고 각 합체 끝에 설치된 GINA 개스킷이 1차 압착돼 외부로부터 바닷물이 더는 들어오지 못한다.

합체의 미세접합을 위해서는 거리 측정 센서(distance sensor)와 트랜스폰더(transponder), Taut wire 등을 사용하였다. Taut wire는 본체를 기존 합체에 설치한 후 길이 70 m, 5 kg의 인장력을 갖는 와이어를 다음 합체에 연결하여 합체 간의 거리 및 인장 각도를 측정하는 장비이다(Fig. 25).

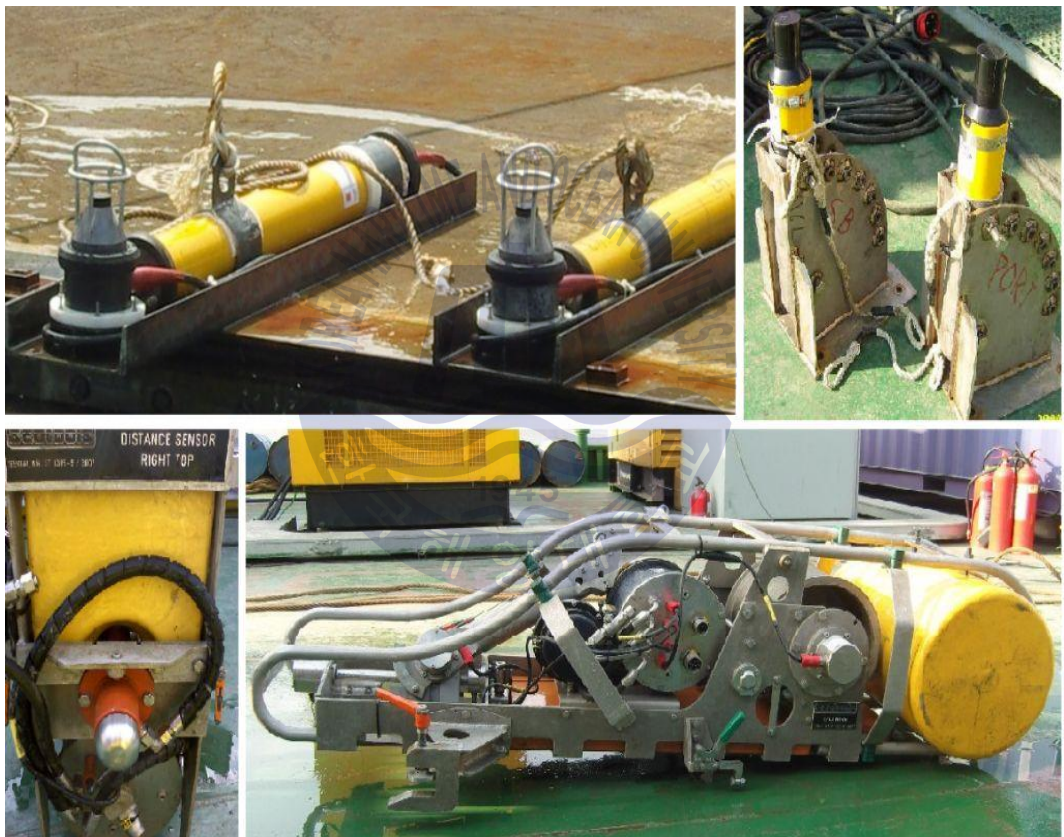


Fig. 25 Transponder, Sensor, Taut wire unit

Fig. 26은 Taut wire를 이용한 두 합체 간의 미세 접합 개념도이다. 기존 합체와 새로 설치될 합체가 와이어로 연결되어 있으며, 측정한 정보는 자이로컴퍼스(gyrocompass)와 경사계(inclinometer)에 전달되어 상황실로 취합된다.

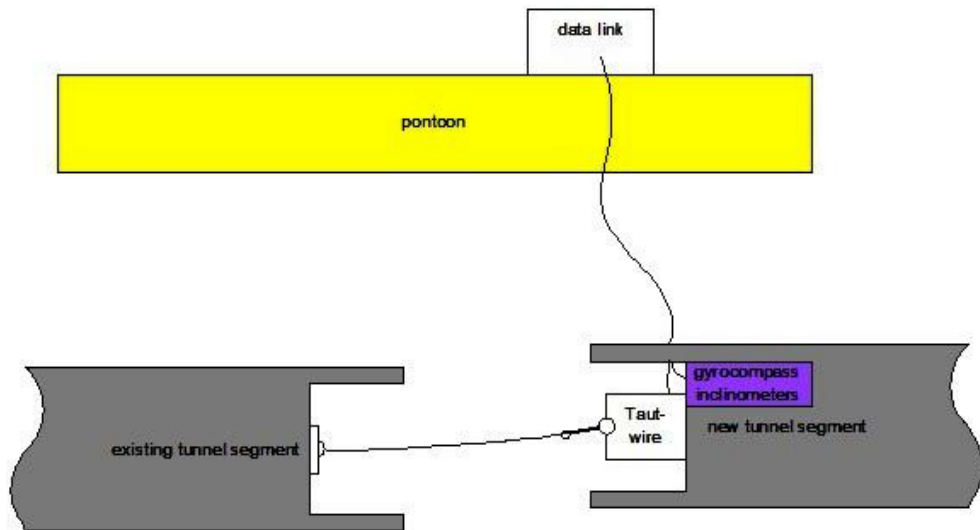


Fig. 26 Setting up a Taut wire system

1차 접합 후 먼저 설치된 합체 임시 벽에 있는 밸브를 열어 벽 사이에 갇힌 바닷물을 빼내면 접합부 수압은 감소하고 후방 측 수압은 변동이 없어 양측 수압 차로 인해 GINA 조인트가 압축되면서 두 합체가 접합된다. 이어 외부의 2차 조인트인 오메가 실(omega seal)을 설치하고 침매합체가 선박 충돌, 침몰 하중 및 선박 앵커에 의한 충격으로부터 보호하기 위해 자갈, 돌 등을 이용해 되메우기한다. Fig. 27은 합체 접합부 단면의 GINA 개스킷과 GINA 프로텍터이다.



Fig. 27 GINA gasket and GINA protector

거가대교 침매터널 현장에서의 잠수작업은 잠수 전용 바지선을 사용하였다. 잠수 전용 바지선은 길이 약 80 m, 폭 30 m, 총톤수 995 ton으로 잠수 관련 장비와 함체 침설 후 부속 기계류를 인양하기 위한 작업 공간을 보유하고 있다. 작업 조건과 해상상태에 따라 2점 묘박(mooring) 또는 4점 묘박을 선택할 수 있으며, 바지선에 설치된 GPS(위성항법장치)를 이용해 함체의 정확한 위치를 확인하여 작업을 수행할 수 있다.

잠수 전용 바지선에는 중앙에 150 ton 크레인이 있으며, 양옆으로 잠수 조정실과 나이트록스 시스템, 잠수 챔버 컨테이너가 설치되었다. 웨트벨과 LARS(launch and recovery system)가 그 옆에 설치되었고 반대편으로는 발전기와 잠수 장비 컨테이너, 사무실 등이 설치되었다. 잠수 전용 바지선의 구조와 장비 배치는 Fig. 28과 같다.



Fig. 28 Dive support barge

3.1.1 잠수사 현황 및 임무

침매터널 잠수작업에는 3년간 약 30명의 잠수사가 참가하였다. 국적별로는 대한민국, 영국, 독일, 네덜란드, 인도 국적으로 연령은 28-50세 사이로 최소 5-20년의 잠수 경력이 있는 잠수사로 구성되었다. 잠수팀은 대한민국, 네덜란드, 인도 출신의 잠수감독관의 관리 하에 3개의 팀으로 구분하였다.

잠수팀은 작업 환경과 작업의 종류에 따라 작업 인원이 다소 유동적이었지만 기본적으로 최소 10명 정도로 구성되었다. 잠수작업은 평소에 3개의 잠수팀으로 나누어 운용하였다. 함체 침설 중에는 24시간 동안 연속적인 작업이 필요했으므로 각 잠수팀이 12시간씩 교대로 근무했으며, 침설 후에는 3개의 잠수팀이 같이 1일 12시간을 근무했다. Table 4에 잠수작업팀을 분류하였다.

Table 4 Summary of dive team

A 작업팀	B 작업팀	C 작업팀
대한민국 잠수감독관. 대한민국 잠수사로 구성. 연령 25-45세, 10명. 주로 Day shift에 근무하였으며, 함체 침설 중에는 Night shift로 이동하여 근무함.	네덜란드 잠수감독관. 네덜란드 잠수사로 구성. 연령 25-50세, 9명. 초기 침매터널 작업 시 수중작업을 주도하였음. 주로 Day shift에 근무하였음.	영국 잠수감독관. 인도 잠수감독관. 영국, 인도, 독일의 잠수사로 구성. 연령 25-45세, 11명. Day shift에 근무하였으며, 함체를 침설할 때는 교대로 근무함.

잠수사의 임무는 크게 Pre-Immersion, Immersion, After-Immersion으로 나눌 수 있다. 함체 침설 전에는 침설할 함체의 수밀 부위를 정밀 검사하고 침설에 필요한 각종 센서와 기계류, EPS 등을 설치하게 된다. 침설 중에는 함체의 접합부에 대한 측정과 검사를 시행한다. 함체 침설 후에는 침설 작업에 사용된 각종 장비와 함체에 설치된 구조물을 분리하고 인양하게 된다.

Table 5는 침매터널 작업 시 잠수사가 수행하여야 할 상세한 작업 내용이다.

Table 5 General tasks for dive plan immersion

Pre-Immersion	Immersion	After-Immersion
<ul style="list-style-type: none"> • Inspection of GINA seal. • Installation of umbilical conduit. • Test installation of alignment/measuring equipment. • Installation of corner pipe and blind flange. • Installation of push-pull jack frames. • Attach cables for EPS system. • Installation of EPS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Removal of GINA protection. • Inspection of GINA seal. • Deck layout checks and preparation. • Inspection of mooring and rigging. • Cleaning bulkhead and inspection of seabed on previously installed element. • Installation of alignment/measuring equipment. • Connection of taut wire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspection of GINA seal and seabed. • Fitting for push-pull jacks. • Disconnection of power/data cables. • Removal of EPS. • Deck layout removal. (Bollard, Lifting lugs, Fairlead, Swiveling sheave, Horizontal sheave, Access shaft and tower, Alignment tower, Guide beam. etc.)

Fig. 29는 침매터널 잠수 현장의 실제 잠수사 로그이다. 작업 장소는 잠수 전용 바지선, 해양 7001호로 6번째 함체를 침설한 후 실시한 잠수작업이다. 로그에 의하면 잠수사는 표면공급식 잠수 장비와 다이빙헬멧을 사용하였다. 작업 수심은 23 m였으며, 08시 11분에 입수해 09시 30분에 수면에 도착하여 65분간 잠수작업을 시행하였다. 잠수사의 호흡기체로는 EAN40을 사용하였다. 잠수사는 함체에 설치된 리프팅-러그(lifting lug)를 인양하기 위해 유압 너트(hydraulic nut)를 제거하였으며, 작업 도중 사용하던 특수 공구가 망가졌음을 알 수 있었다. 감압은 3 m에서 11분간 실시하였다. 거가대교 침매터널 잠수 현장에서 시행된 모든 잠수작업과 그 내용은 잠수사의 로그북에 기재하였으며 잠수감독관의 확인을 받았다.

IMCA Professional Diver's Logbook Record of Dive

Date of dive: 19 12 08 Diver's signature: [Signature]

Name of diving contractor: OTN

Address of diving contractor: Nett

Dive/worksite location: No. 6 TE Vessel/installation: BARGE HAE YANG 7001

Type of dive: ☒ Surface ☐ Wet bell ☐ Bell bounce ☐ Bell cap

☐ Other:

Bell Bounce or Surface Dives:

Maximum depth of dive: 08 ft 23 metres

Time left surface or started pressurisation: 08 hrs 11 minutes

Bottom time: 09 hrs 65 minutes

Decompression completed at: 09 hrs 30 minutes

Running total number of surface dives: 0

For surface decompression only:

Surface interval: 0 hrs 0 minutes

Time spent in chamber: 0 hrs 0 minutes

Saturation Dives:

Storage depth: 0 ft 0 metres

Maximum depth of dive: 0 ft 0 metres

Bell lock-off: 0 hrs 0 minutes

Diver left bell: 0 hrs 0 minutes

Diver returned to bell: 0 hrs 0 minutes

Lock-out time: 0 hrs 0 minutes

Running total of lock-out hours: 0 hrs 0 minutes

Bell lock-on: 0 hrs 0 minutes

Type of helmet or mask used: KM 27

Breathing mixture used: NITROX 40/60

Work description, equipment and tools used: REMOVE LIFTING LUG, 2x Hydraulic Nuts
Broken Special tool.

Type of decompression schedules used: 3m M.F.J. Straetmans

Notes regarding any decompression sickness or other illness or injury: Supervisor

Any other remarks: [Smiley Face] Reg.nr.: 494

Name of diving supervisor: [Signature] Company stamp: [Stamp]

Signature: [Signature] Date: 19-12-2008

Fig. 29 Diver's logbook(Busan-Geoje Fixed Link Project)

3.1.2 사용한 기체의 분류

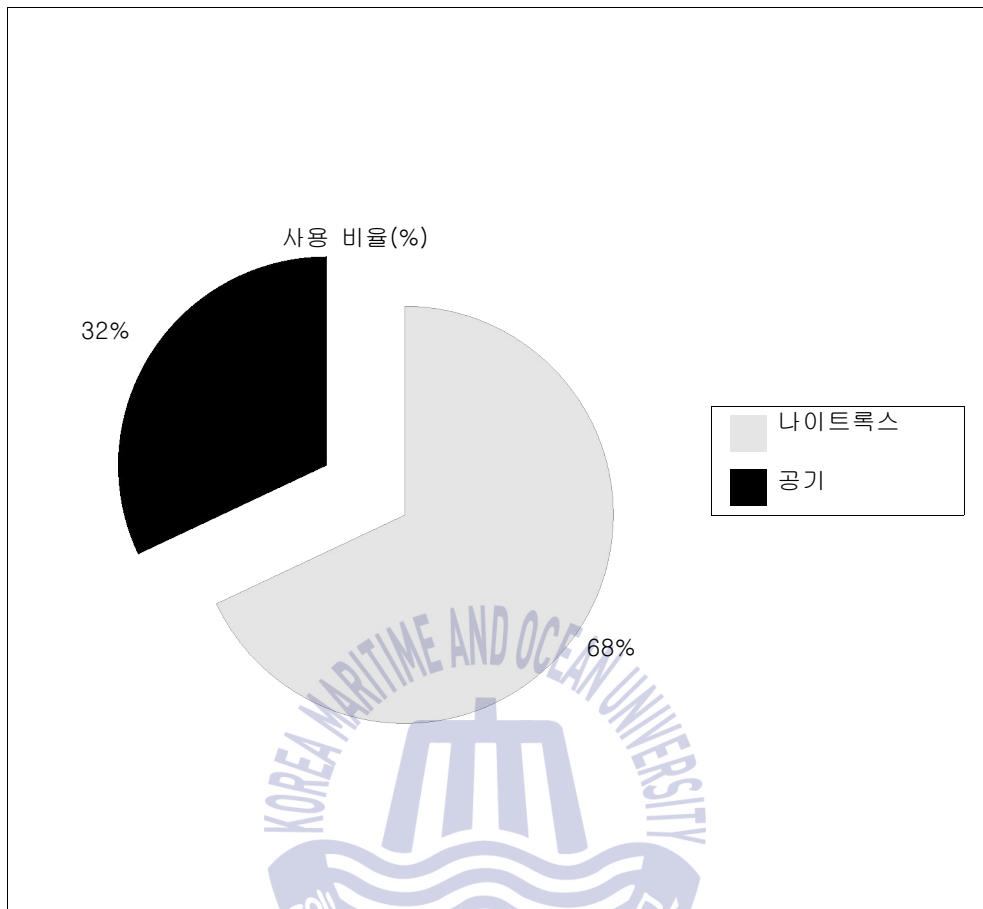
침매터널 현장의 잠수작업에는 잠수사의 주 호흡 기체로 나이트록스와 공기를 사용하였다. 잠수작업 초기에는 약 10개월간 공기만을 사용하였다. 그러나 5번째 합체의 침설 후부터 수심이 깊어지고 반복 잠수로 인한 잠수사의 피로 누적으로 나이트록스의 사용을 고려하였다.

Table 6은 잠수작업에 사용한 기체이다. 전체 651회의 잠수작업 중 나이트록스는 441회 사용하였고 공기는 210회 사용하였다. 전체 작업시간은 39,406분이다. 사용시간의 측면에서 나이트록스는 29,063분 사용하였고 공기는 10,343분 사용하여 나이트록스의 사용시간이 약 2배 이상 많다.

Table 6 Comparison of air and nitrox dive times

항 목	나이트록스	공기	합 계
사용 횟수	441회	210회	651회
사용시간	29,063분	10,343분	39,406분

Fig. 30은 나이트록스와 공기의 사용 비율이다. 나이트록스의 사용 비율은 약 68%이고 공기의 사용 비율은 32%로 나이트록스의 사용 비율이 약 2배 이상 많음을 확인할 수 있다.



3.1.3 수심별 잠수작업 분포

침매터널 잠수작업은 가덕도의 1번 함체부터 중죽도의 18번 함체까지 총 18개의 함체를 연결해 해저터널을 만드는 작업이다. 1번 함체에서 9번 함체까지 약 1.6 km의 구간의 수심은 약 8-33 m까지 완만한 경사로 깊어진다. 10번 함체에서 수심은 급격히 깊어지고 13번 함체에서 최대 50 m의 작업 수심에 이른다. 그 후로 마지막 18번 함체까지 서서히 높아져 육상의 연결부로 이어진다.

Fig. 31은 각 함체별 작업 수심이다. 전체적인 모습은 W자 형태로 좌측에 0-50 m의 수심을 표시하였으며, 각 함체의 작업 수심을 확인할 수 있다. 침매터널 잠수작업의 평균수심은 25.68 m이다.

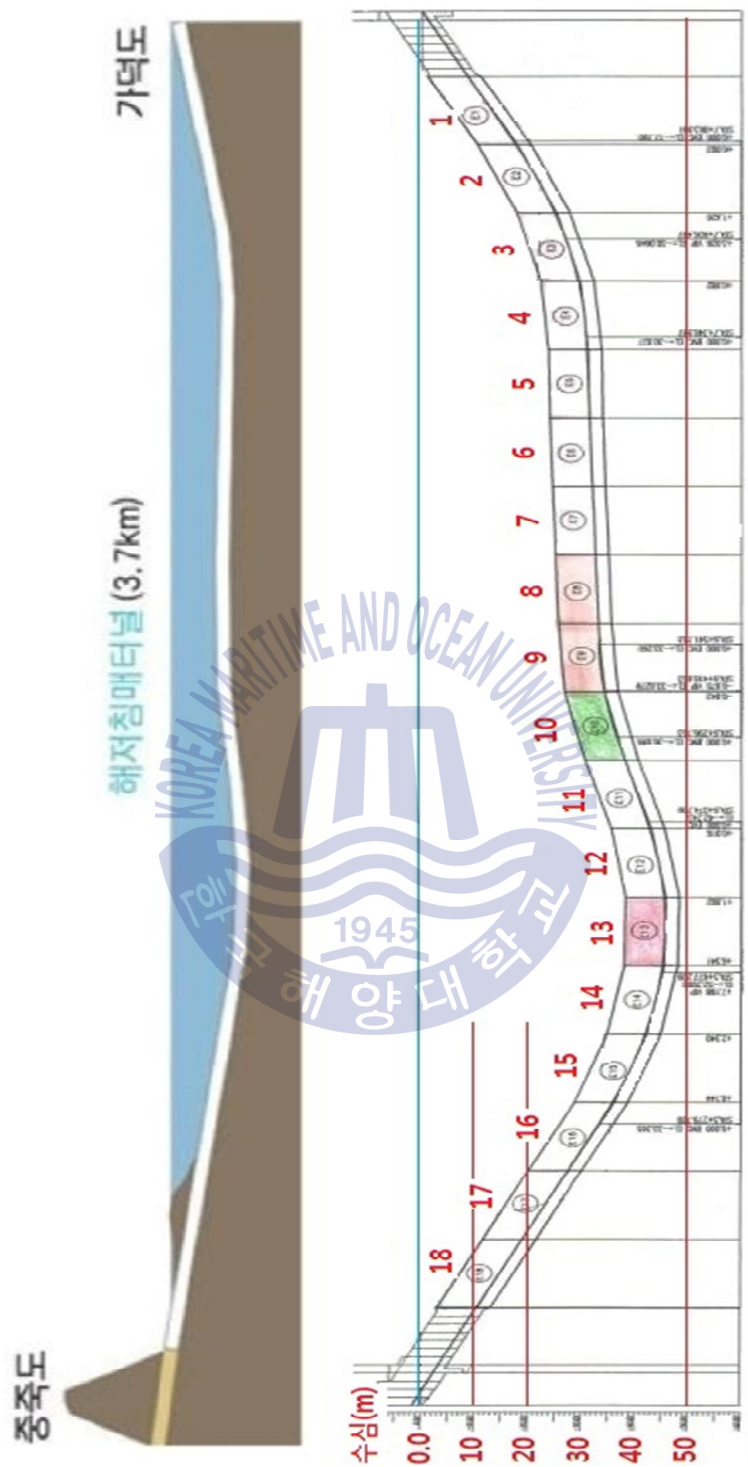
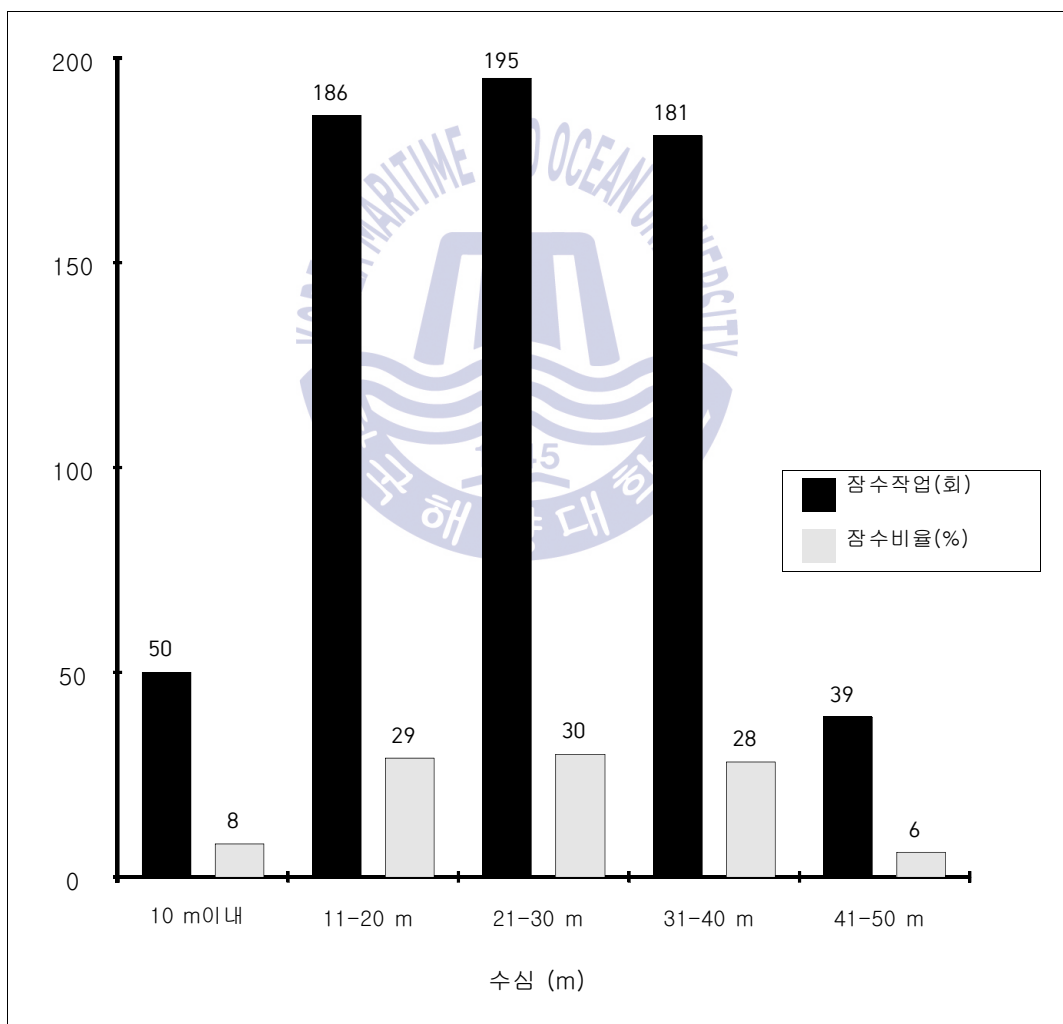


Fig. 31 Diving depth in Busan-Geoje Fixed Link Project

Fig. 32는 수심별 잠수작업 분포이다. 자료에서 10 m미만에서의 잠수작업은 50회 시행되었으며, 대부분 1번과 18번 함체에서 이루어졌다. 작업시간은 3,134분이고 잠수비율은 약 8%이다. 세부적으로 11-20 m에서 잠수작업은 186회 시행되었으며, 작업시간은 11,393분으로 전체 잠수작업의 약 29%에 해당한다. 21-30 m에서 잠수작업은 195회로 작업시간은 11,940분이며, 잠수 비율은 약 30%이다. 31-40 m에서 잠수작업은 181회, 작업시간은 11,079분으로 잠수 비율은 약 28%이다. 해저터널 구간의 가장 깊은 수심구간인 41-50 m에서의 잠수작업은 39회 시행되었으며, 작업시간은 1,860분으로 전체 잠수작업의 약 6%에 해당한다.



이상에서 알 수 있듯이 대부분 잠수작업은 11-40 m 사이의 수심에서 시행되

었으며, 전체 잠수작업의 85%에 해당하는 562회의 잠수가 시행되었다. Table 7은 나이트록스와 공기의 수심별 잠수작업 분포이다.

Table 7 Nitrox vs. Air diving distribution by depth

항 목	나이트록스 잠수		공기 잠수	
	작업 횟수	작업시간	작업 횟수	작업시간
10 m이내	23회	1,687분	27회	1,447분
11-20 m	94회	6,680분	92회	4,713분
21-30 m	150회	9,594분	45회	2,346분
31-40 m	144회	9,476분	37회	1,603분
41-50 m	30회	1,626분	9회	234분
합 계	441회	29,063분	210회	10,343분

전체 잠수작업 중 나이트록스를 사용한 잠수작업은 441회 시행되었으며, 전체 작업시간은 29,063분이다. 10 m 미만의 잠수작업은 23회로 수중 작업시간은 1,687분이다. 11-20 m에서의 잠수작업은 94회로 작업시간은 6,680분이다. 21-30 m에서는 잠수작업 150회, 작업시간은 9,594분이다. 31-40 m에서는 잠수작업 144회, 작업시간은 9,476분이다. 41-50 m에서는 30회 사용하였으며, 작업시간은 1,626분이다. 공기 잠수는 총 210회 시행되었으며, 수중 작업시간은 10,343분이다. 세부적으로 10 m 미만에서의 잠수작업은 27회, 작업시간은 1,447분이다. 11-20 m에서의 잠수작업은 92회로 작업시간은 4,713분이다. 21-30 m에서의

잠수작업은 45회, 작업시간은 2,346분이다. 31-40 m에서의 잠수작업은 37회, 작업시간은 1,603분이다. 41-50 m에서는 9회의 잠수작업을 시행하였으며 작업시간은 234분이다. 공기 잠수의 경우 수심이 깊어질수록 사용횟수가 점차 감소하였다. Fig. 33은 나이트록스 및 공기의 잠수작업 비율이다.

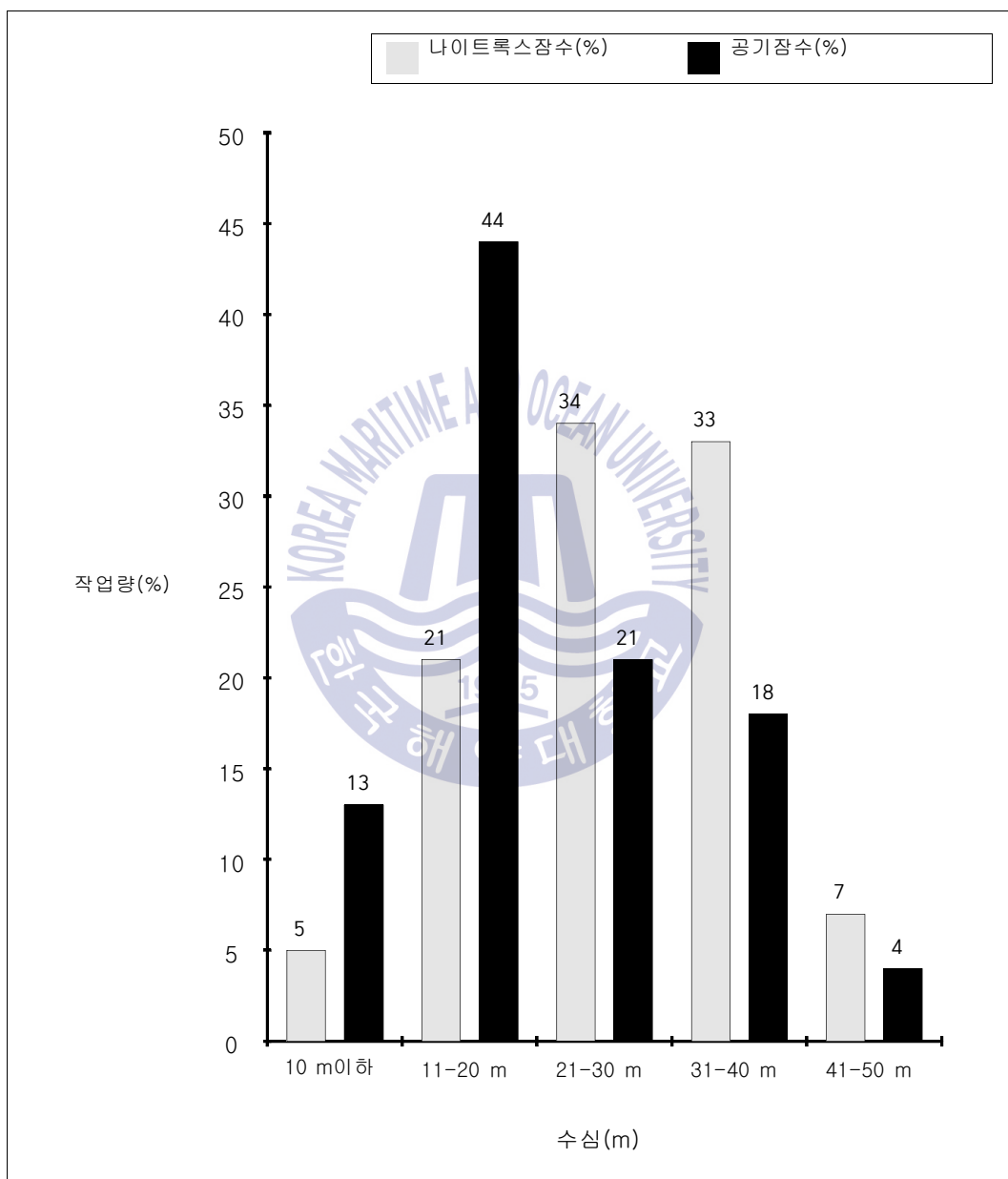


Fig. 33에서 알 수 있듯이 수심 20 m 미만의 잠수작업에서는 공기 잠수의 비

율이 높지만, 수심 20 m 이후에는 나이트록스를 사용한 잠수작업이 증가한 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 잠수사들은 약 수심 30 m부터 공기로 인한 호흡저항과 질소마취 증세를 느끼기 시작하고, 약 수심 50 m에 이르게 되면 거의 대다수 잠수사에게 이러한 증세가 나타난다. Table 8에 수심 30 m 이하의 잠수작업을 공기와 나이트록스로 구분하였다.

Table 8 Number of divers below 30 m depth

수심(m) \ 사용 기체	공기	나이트록스
30-39 m	42회	148회
40-50 m	9회	43회
합 계	51회	191회

침매터널 잠수작업에서 30 m 이하의 잠수작업은 총 242회 시행되었다. 그중 30-39 m 수심에서의 공기 잠수가 42회였고, 나이트록스 잠수가 148회였다. 40-50 m 수심에서는 공기 잠수가 9회 시행되었고, 나이트록스 잠수가 43회 시행되었다. 전체 작업의 평균수심은 36.7 m이며, 평균 작업시간은 58.9분이었다. 그중 공기 잠수의 평균 작업 수심은 34.9 m이며, 나이트록스 잠수의 평균 작업 수심은 37.1 m이다. 30 m 이하의 잠수작업에서 나이트록스의 사용량이 공기보다 약 3.7배 정도 많다. 반면 작업시간은 나이트록스가 공기보다 약 6배 정도 많다.

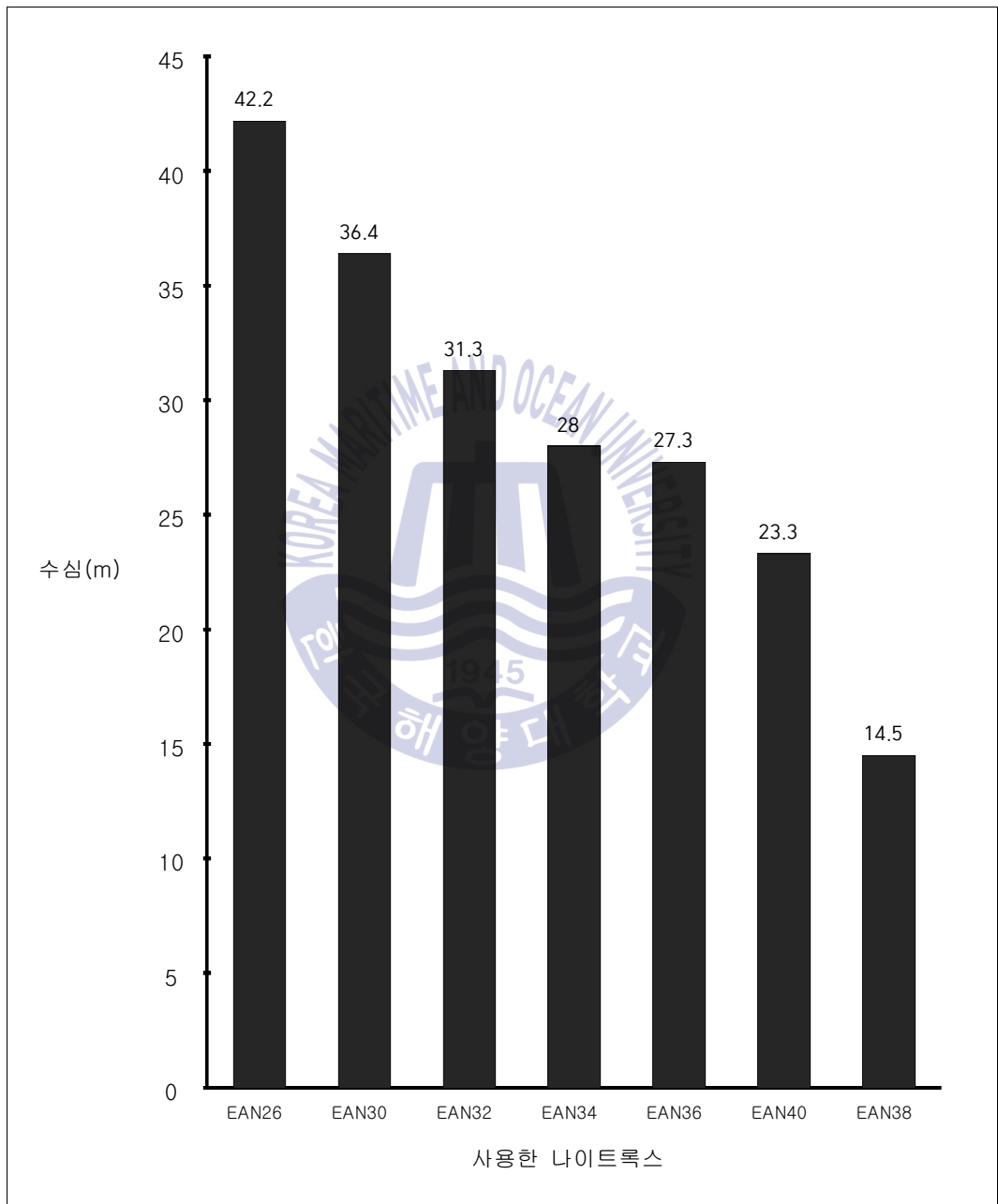
3.1.4 나이트록스의 분류

침매터널 잠수작업에서는 작업 수심에 따라 EAN26, EAN30, EAN32, EAN34, EAN36, EAN38, EAN40의 나이트록스를 사용하였다. 전체 7가지 종류의 나이트록스 중 EAN40을 128회로 가장 많이 사용하였으며, 총 사용시간은 8,174분이다. 다음 EAN32를 127회 사용하였으며, 사용시간은 8,305분이다. EAN38은 54회, 4,784분 사용하였으며, EAN34는 49회, 3,095분 사용하였다. 그리고 EAN30이 5회, 148분으로 가장 적게 사용하였다. **Table 9**는 각 나이트록스의 종류별 사용 횟수와 사용시간이다.

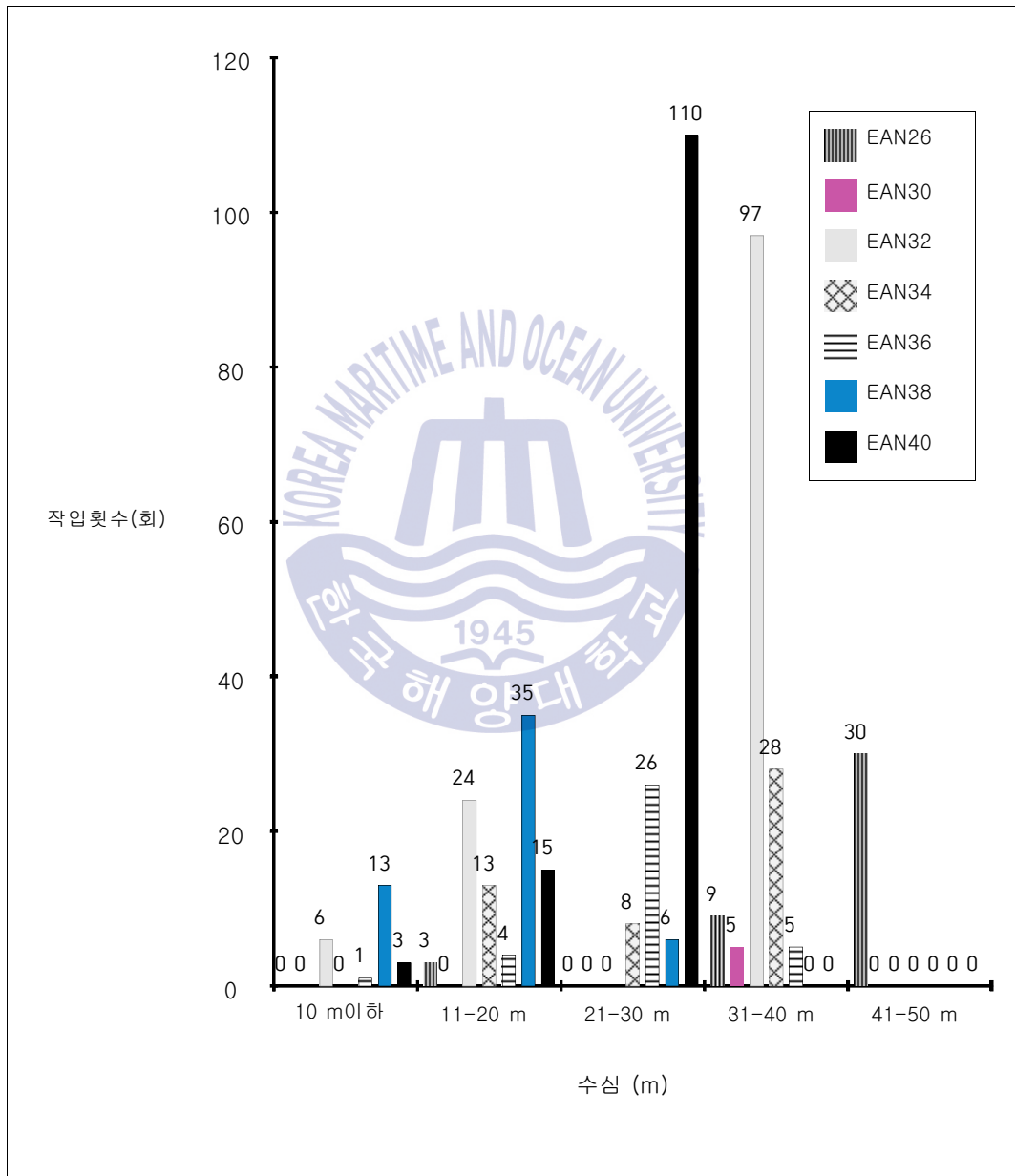
Table 9 Use of various nitrox gases

나이트록스 종류	사용 횟수	사용시간
EAN40	128회	8,174분
EAN32	127회	8,305분
EAN38	54회	4,784분
EAN34	49회	3,095분
EAN26	42회	2,205분
EAN36	36회	2,352분
EAN30	5회	148분
합 계	441회	29,063분

다음은 각 나이트록스의 평균 작업 수심을 살펴보았다. 전체 나이트록스 잠수의 평균 작업 수심은 27.3 m이었으며, 가장 깊은 수심에서 사용한 나이트록스는 EAN26으로 평균수심은 42.2 m이다. Fig. 34에 나이트록스별 평균 작업 수심을 나타내었다.



다음은 수심별로 사용한 나이트록스를 살펴보았다. Fig. 35는 수심별 나이트록스의 사용 분포이다. 10 m미만에서는 EAN38을 가장 많이 사용하였으며, 11-20 m에서는 EAN38을 가장 많이 사용하였다. 21-30 m에서는 EAN40, 31-40 m에서는 EAN32를 가장 많이 사용하였다. 41-50 m에서는 EAN26만 30회 사용하였다.



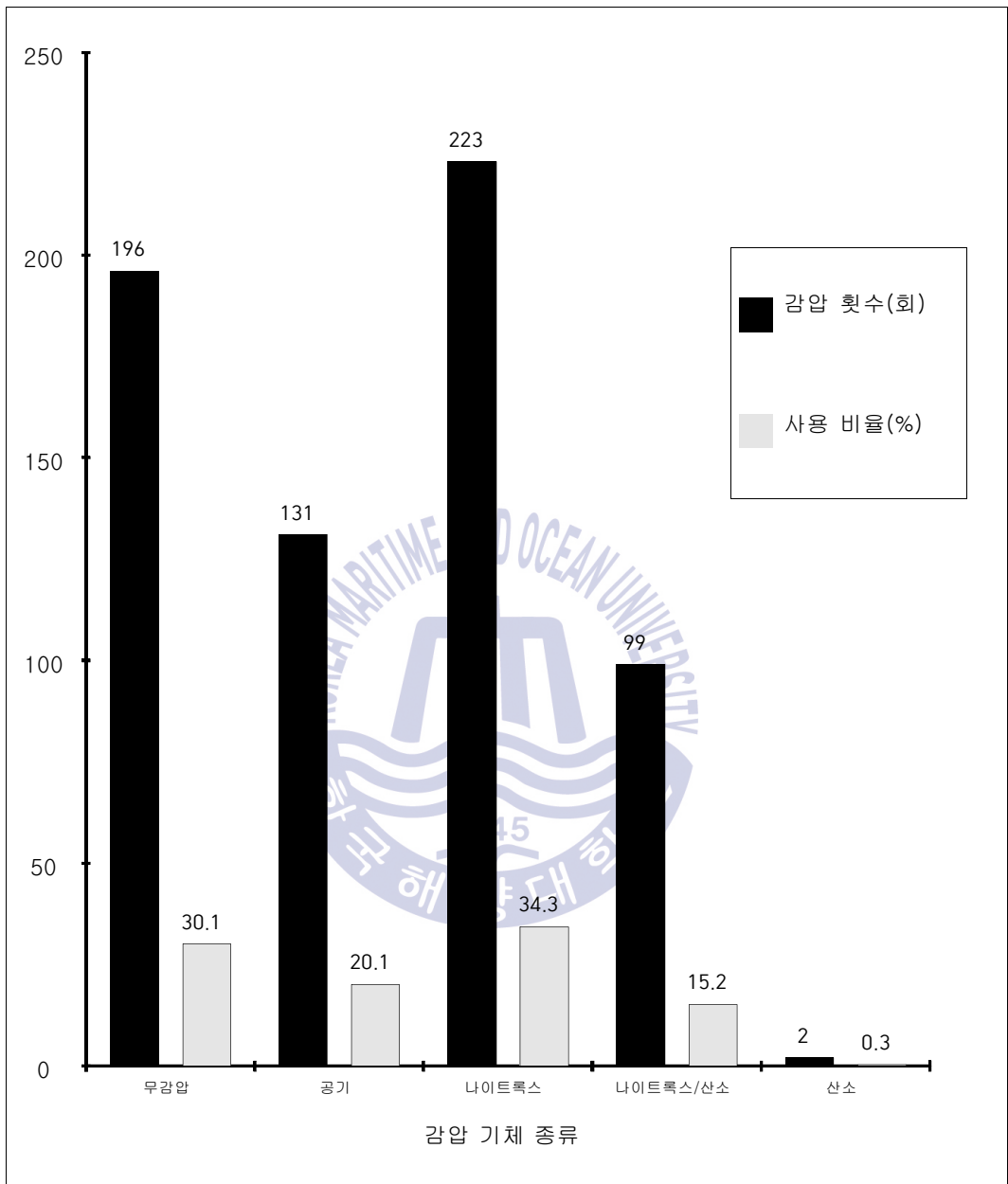
3.1.5 감압 기체의 분류

침매터널 잠수작업에서는 전체 651회의 잠수작업 중 무감압 잠수 196회를 제외한 455회의 잠수에서 감압이 시행되었다. 감압 기체로는 공기, 나이트록스, 산소 등을 사용하였다. 전체 감압 잠수 중 공기를 사용한 감압은 131회로 약 20%의 사용비율을 나타낸다. 나이트록스를 사용한 감압은 223회로 전체의 약 34%에 해당한다. 나이트록스와 산소를 같이 사용한 감압은 99회로 약 15%에 해당한다. 산소만 사용한 감압은 2회로 0.3%이다(Table 10).

Table 10 Comparison of various decompression type

항 목	감압 횟수	백분율	평균 작업수심
무감압	196회	30.1%	15.0 m
공기 감압	131회	20.1%	23.7 m
나이트록스 감압	223회	34.3%	29.4 m
나이트록스와 산소를 같이 사용한 감압	99회	15.2%	36.9 m
100% 산소감압	2회	0.3%	35 m
합 계	651회	100%	-

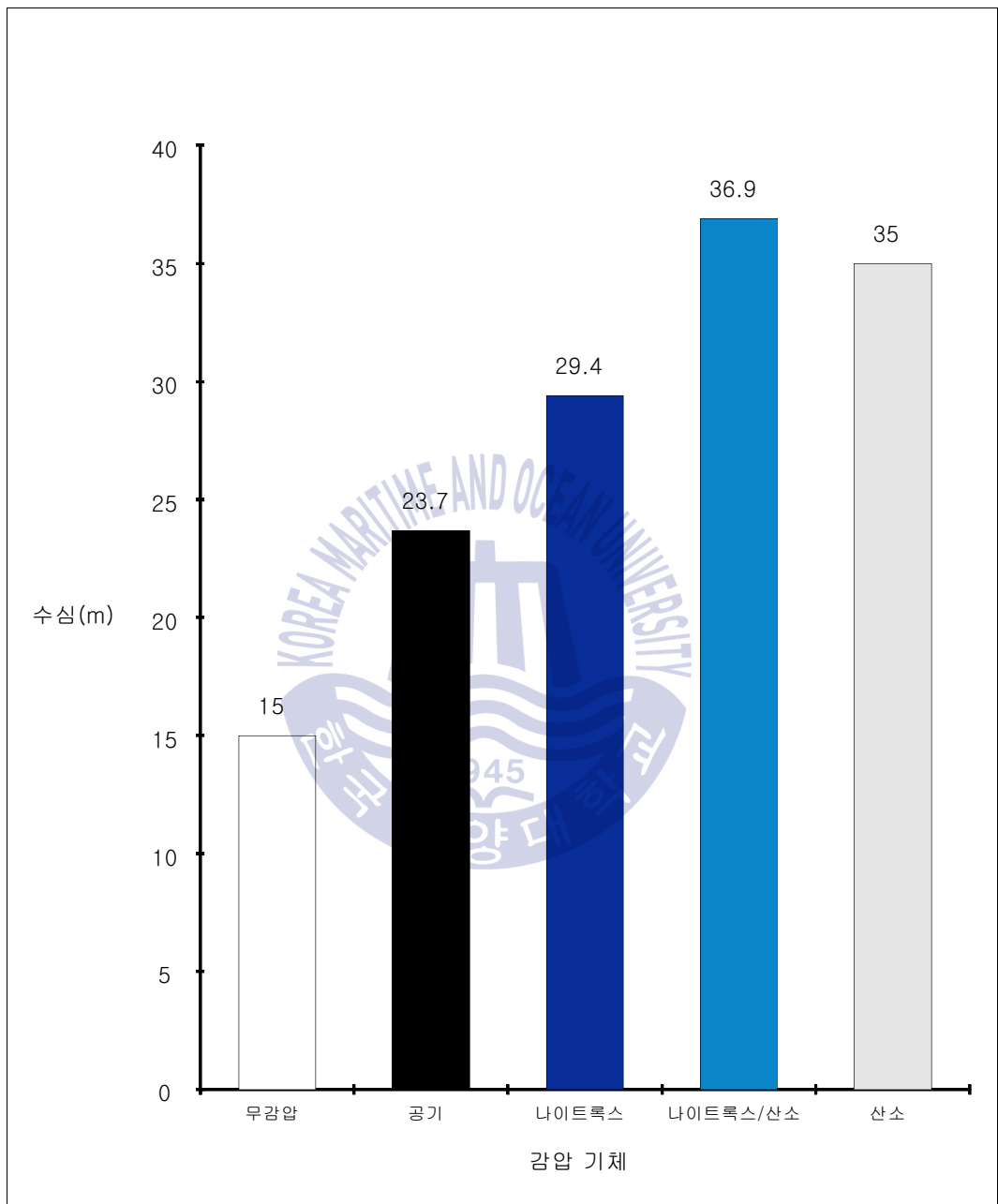
Fig. 36은 감압 기체의 사용 분포이다.



다음은 감압 기체와 작업 수심과의 관계를 살펴보았다. Fig. 37은 사용된 각 감압 기체별로 평균 작업 수심을 나타낸다. 자료에서 공기 감압의 평균 작업 수심은 약 23.7 m, 나이트록스 감압의 평균 작업 수심은 29.4 m이다.

나이트록스와 산소를 사용한 감압의 평균 작업 수심은 36.9 m, 산소만 사용

한 감압의 평균 작업 수심은 35 m이었다. 30 m 이하의 잠수작업에는 감압에 산소를 사용하였음을 확인할 수 있다.



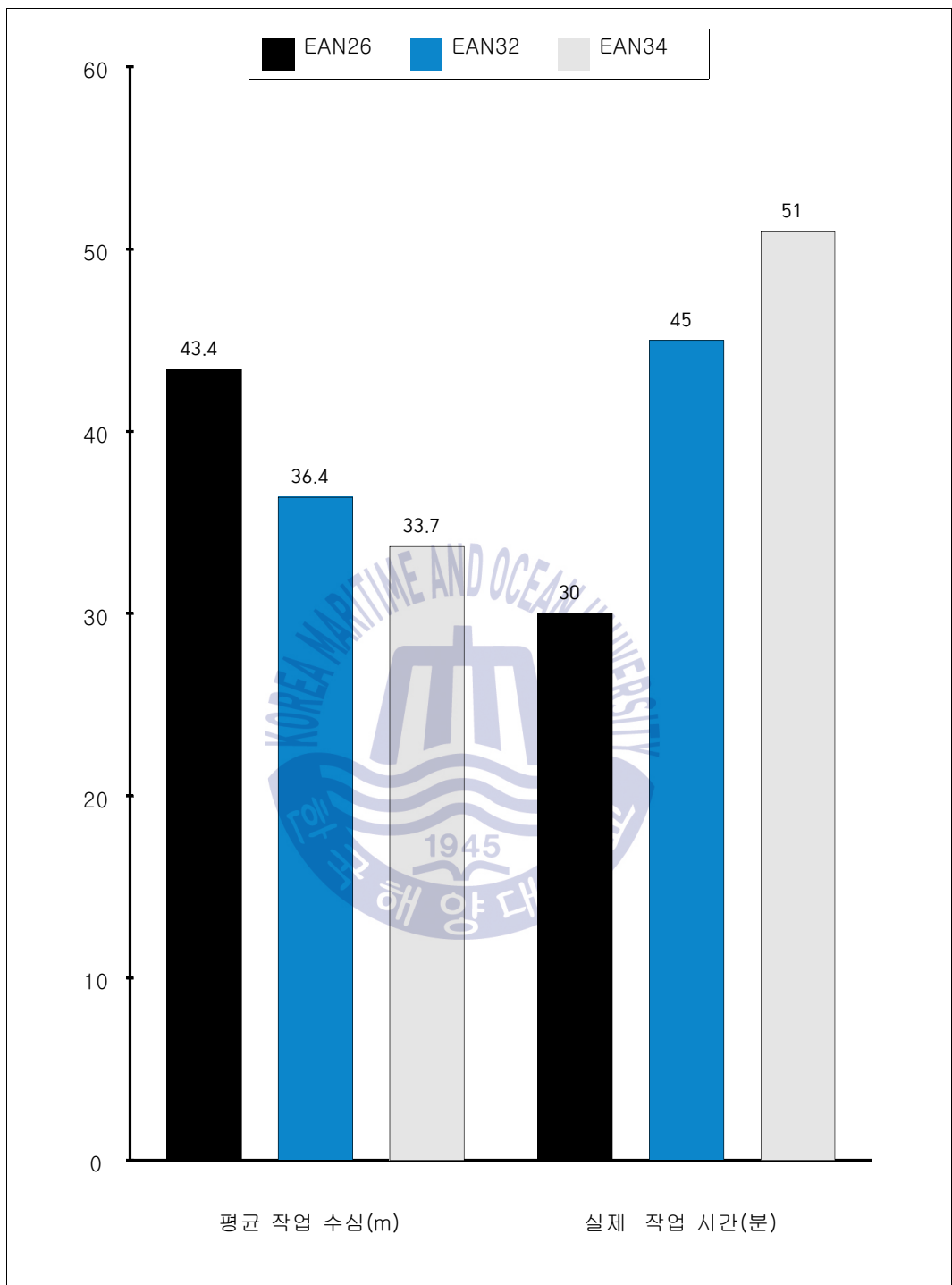
산소를 사용한 감압은 총 101회로 모두 30 m 이하의 나이트록스 잠수에서만 시행되었다. 사용된 나이트록스는 EAN26, EAN32, EAN34이다. 평균 작업 수심

은 36.9 m이며 31-40 m에서 89회, 40-50 m에서 12회가 시행되었다. Table 11은 나이트록스별 산소감압을 시행한 횟수와 평균 작업 수심, 평균 작업시간이다.

Table 11 Oxygen decompression data of various nitroxes

항 목	EAN26	EAN32	EAN34
산소감압 횟수	14회	70회	17회
평균 작업 수심	43.4 m	36.4 m	33.7 m
평균 해저체류시간	50분	66분	67.4분

자료에서 EAN26의 평균 작업 수심은 43.3 m이며, 평균 해저체류시간은 50분이다. 산소감압 시간이 약 23분이었으므로 실제 작업시간은 약 30분이었다. EAN32의 평균 작업 수심은 36.4 m이며 평균 해저체류시간은 66분이다. 그중 산소감압 시간이 약 21분이었으므로 실제 작업시간은 약 45분이다. EAN34의 평균 작업 수심은 33.7 m이며, 평균 해저체류시간은 67분이다. 그중 산소감압 시간이 약 16분이었으므로 실제 작업시간은 약 51분이다. 산소를 사용한 평균 감압 시간은 약 20분이다. Fig. 38에 산소감압을 실시한 잠수작업의 평균 작업 수심과 실제 작업시간을 표시하였다.



3.1.6 사용한 다이브 테이블

침매터널 잠수작업에서는 작업 수심과 사용한 기체, 감압의 종류에 따라 V-planner 산업 잠수 다이브 테이블, 네덜란드의 NSIL-88 다이브 테이블, NITROX40/60 다이브 테이블, 캐나다의 DCIEM 다이브 테이블 그리고 미국의 USN 다이브 테이블을 사용하였다.

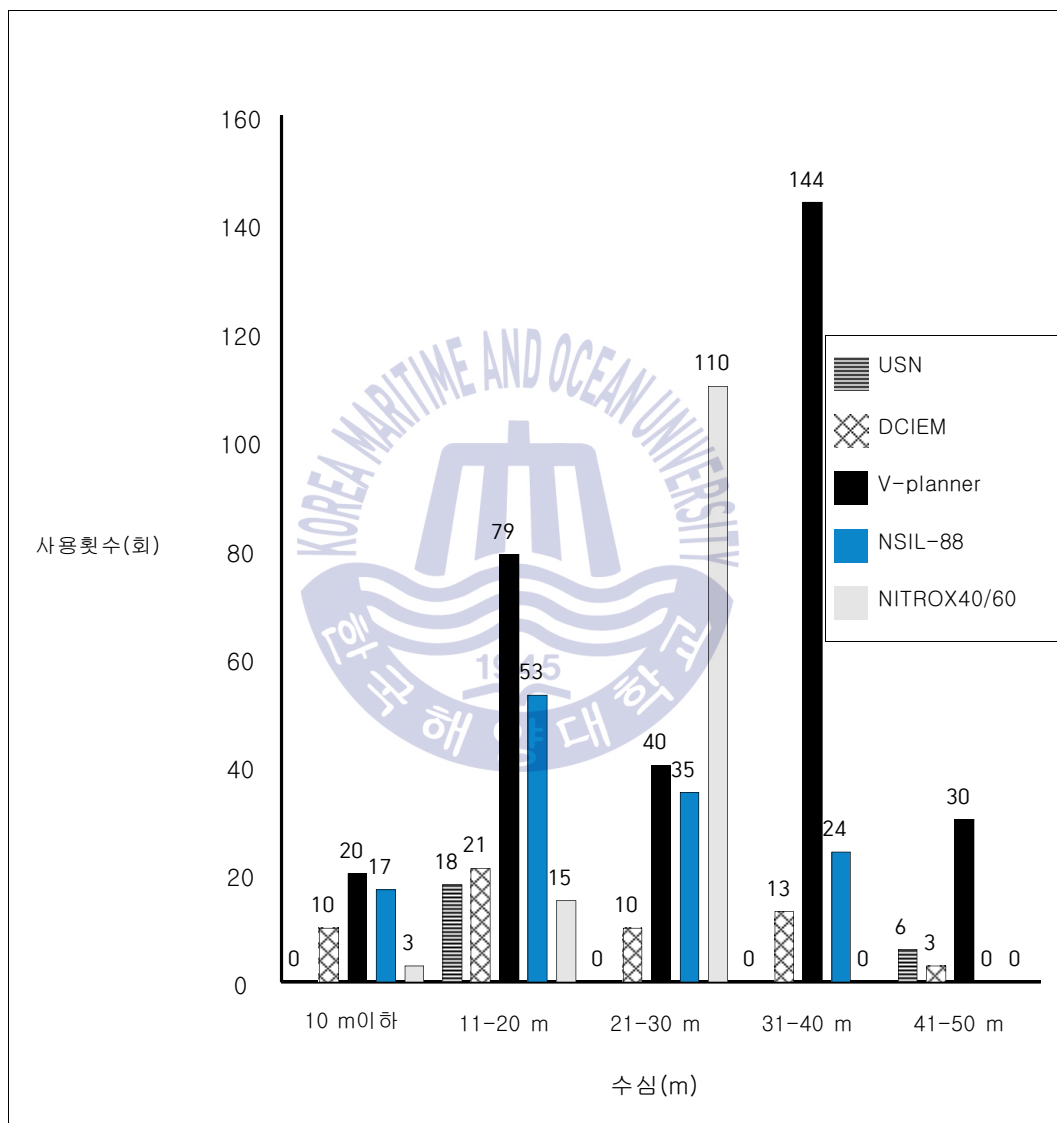
V-planner 산업 잠수 다이브 테이블이 313회로 가장 많이 사용하였으며, 전체의 약 50% 이상의 비율로 나이트록스와 공기 잠수에서 모두 사용하였다. NSIL-88 다이브 테이블과 NITROX40/60 테이블이 각 129회와 128회 사용하였다. DCIEM 다이브 테이블과 USN 다이브 테이블은 각각 57회 및 24회 사용하였다. **Table 12**는 수심별 다이브 테이블 사용 횟수이다.

Table 12 Classification of decompression table by depth

수 심(m)	V-planner	NSIL-88	NITROX40/60	DCIEM	USN
10 m 이하	20회	17회	3회	10회	0회
11-20 m	79회	53회	15회	21회	18회
21-30 m	40회	35회	110회	10회	0회
31-40 m	144회	24회	0회	13회	0회
41-50 m	30회	0회	0회	3회	6회
합 계	313회	129회	128회	57회	24회

자료에서 20 m 이하의 작업에서는 V-planner와 NSIL-88 다이브 테이블이 주로 사용하였다. 21-30 m에서는 NITROX40/60 다이브 테이블이 110회 사용하였

으며, 이 수심에서만 약 90%의 사용률을 나타낸다. 31-50 m에서는 V-planner를 가장 많이 사용하였다. 21-30 m 구간을 제외한 모든 수심에서 V-planner를 가장 많이 사용하였음을 알 수 있다. 특히 31-50 m 구간에서 V-planner의 사용률이 높은 것을 확인할 수 있다. **Fig. 39**는 수심별 다이브 테이블의 사용 분포를 나타낸다.



각 다이브 테이블의 평균 작업 수심과 평균 작업시간을 분류하면 **Table 13**과 같다. V-planner 다이브 테이블의 평균 작업 수심은 29.0 m이고, 평균 작업시간

은 66.7분이다. 전체적으로 V-planner 다이브 테이블이 가장 깊은 곳에서 제일 많이 사용하였음을 확인할 수 있다.

Table 13 Average depth and working time of various decompression table

항 목	평균 작업 수심	평균 작업시간
V-planner	29.0 m	66.7분
NITROX40/60	23.3 m	63.9분
DCIEM	21.7 m	56.4분
NSIL-88	19.3 m	52.3분
USN	23.8 m	16.1분

3.1.7 표면공급식 잠수와 웨벨

대부분 작업에서는 표면공급식 잠수 장비와 웨벨을 사용하였다. 웨벨은 상부 공간에 에어포켓이 있어 잠수사가 머리와 상체를 수중에 노출하지 않은 상태를 유지할 수 있으므로 감압에 좀 더 효율적이며 잠수사의 안전성도 향상할 수 있다. 또한 웨벨에는 기본적으로 비상 기체 실린더가 설치되어 비상 상황이 발생 시 사용할 수 있다.

웨벨은 진수와 회수를 위한 LARS와 호이스트 와이어(bell lifting wire)로 연결되어 상하로 이동한다. 또한 하부에는 클럼프 웨이트(clump weight)를 설치

해 가이드 와이어의 아랫부분에 장력을 주어 웨벨이 수직으로 이동할 수 있도록 한다. 2014년 세월호 구조 현장에 잠시 등장한 다이빙 벨은 LARS 대신 크레인을 사용하여 진수와 회수를 하였다. Fig. 40은 웨벨과 LARS이다.



Fig. 40 Wet bell and LARS

침매터널 잠수작업에서는 표면공급식 잠수 장비를 364회 사용하였고, 웨벨은 287회 사용하였다. 각각의 사용 비율은 55.9%와 44.1%로 표면공급식 잠수 장비를 좀 더 많이 사용하였다. 표면공급식 잠수의 평균 작업 수심은 19.5 m이며, 웨벨의 평균 작업 수심은 32.2 m이다. 30 m 이하의 작업에는 주로 웨벨을 사용하였다. Table 14에 표면공급식 잠수 장비와 웨벨을 비교하였다.

Table 14 Usage of surface supplied diving system vs. wet bell

항 목	표면공급식 잠수	웻벨
사용 횟수	364회	287회
사용 비율	55.9%	44.1%
평균 작업 수심	19.5 m	32.2 m

침매터널은 유속이 심한 외해(外海)에 건설되어 잠수사가 받아들이는 유속에 대한 저항치가 심했다. 웻벨을 사용함으로써 잠수사의 하강 또는 상승할 때에 유속의 영향을 덜 받아 잠수사의 피로를 덜어주고 수중 감압 시 잠수사가 위험 환경에 노출되는 상태와 노출 시간을 줄여 줄 수 있었다.

Table 15는 잠수작업에 영향을 미치는 조류의 유속이다. 표면공급식 잠수의 경우 수중(mid water)에서 1.0 knot, 해저면(bottom)에서 1.2 knot까지 잠수작업을 허용한다. 웻벨을 사용하면 수중에서 1.5 knot, 해저면 에서 1.8 knot로 허용 범위가 증가한다. * 표시는 잠수감독관의 판단으로 수중 작업을 시행할 수 있는 유속의 허용 범위이며, ** 표시는 잠수사가 유속의 영향을 받지 않는 장비를 갖춘 경우나 비상 상황 발생 시만 허용되는 범위이다. 특히, 유속이 심한 외해(外海)에서 잠수작업을 하는 경우에는 작업 전 항상 유속계(current meter)로 유속을 측정하여 안전한 범위에 유지될 때 잠수작업을 시행해야 한다(IMCA, 1987).

Table 15 Effects of current speed on diving operations(IMCA, 1987)

유속 (Knots)	표면공급식 수중 작업 (Mid water)	표면공급식 해저면 작업 (Bottom)	웻벨 수중 작업 (Mid water)	웻벨 해저면 작업 (Bottom)
0.0-0.8	일반작업 (Normal work)	일반작업 (Normal work)	일반작업 (Normal work)	일반작업 (Normal work)
0.8-1.0	대기/관찰 (Observation)	단순작업 (Light work)	일반작업 (Normal work)	일반작업 (Normal work)
1.0-1.2	*	대기/관찰 (Observation)	단순작업 (Light work)	일반작업 (Normal work)
1.2-1.5	**	*	대기/관찰 (Observation)	단순작업 (Light work)
1.5-1.8	**	**	*	대기/관찰 (Observation)
1.8-2.0	**	**	**	*
2.0이상	**	**	**	**

3.2 나이트록스와 공기의 안전성 비교

3.2.1 나이트록스와 공기의 감압병 발생률과 발생원인

침매터널 잠수작업에서 발생한 감압병의 발생률을 비교해 보기 위해 공기 잠수에서의 감압병 발생에 대한 선행 연구들과 비교해 보았다.

Shields (1987)는 공기를 사용한 잠수작업에서의 감압병 발생률에 대해 연구를 하였다. 그의 연구결과에 의하면, 1982년에서 1983년까지 북해의 영국 섹터(UK sector of the North Sea)에서 공기를 사용한 25,740건의 잠수작업 중 총 79건의 감압병이 발생하였으며, 감압병 발생률은 약 0.307%이다. Fig. 41은 79건에 대한 감압병 발생 분포를 나타낸다. 수심 30-40 m, 작업시간 60분 전후로 감압병 발생 분포가 높은 것을 확인할 수 있다.

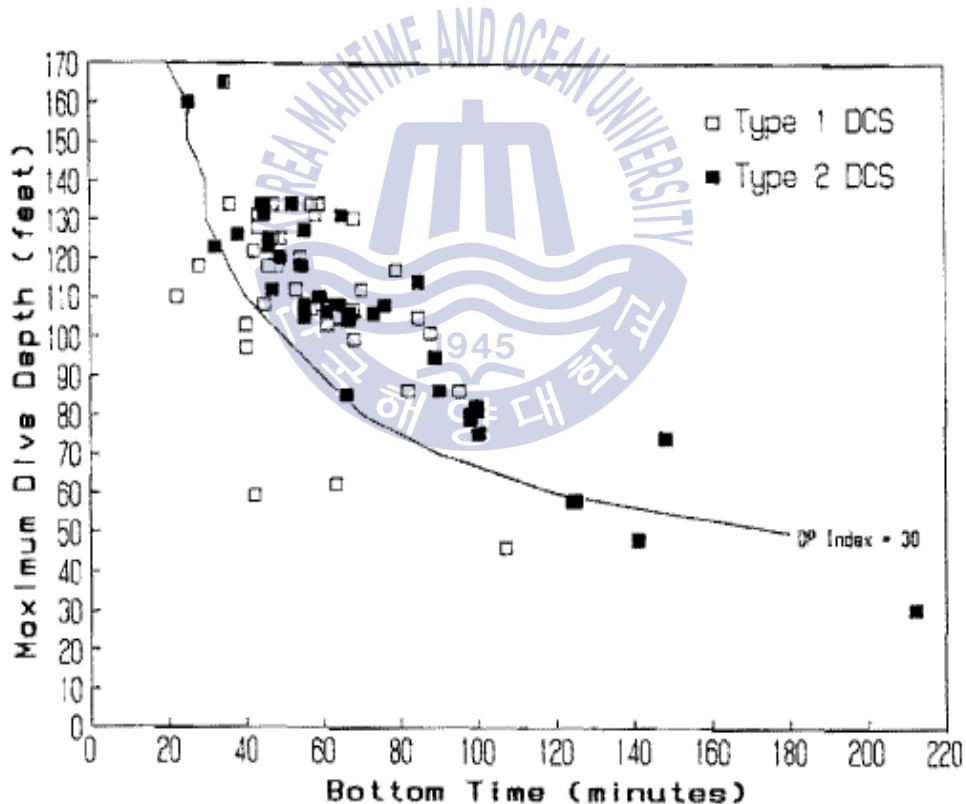


Fig. 41 Depth-time plot of all dives(Shields, 1987)

Table 16에 침매터널 잠수작업에서 발생한 감압병을 분류해 보았다. 전체 651회의 잠수작업 중 공기를 사용한 잠수에서 2건의 감압병이 발생하였으며, 이를 비율로 환산하면 발생률은 0.307%이다. 침매터널 잠수현장의 공기를 사용한 잠수작업에서 감압병 발생률은 공교롭게도 Shields (1987)의 감압병 발생률인 0.307%와 동일하게 나왔다.

Table 16 DCS record in Busan-Geoje Fixed Link Project

항 목	침매터널 잠수작업	
사용 기체	공기	나이트록스
잠수작업 횟수	210회	441회
감압병 발생 횟수	2건	0
감압병 발생률	0.307%	0.0%

하지만 Table 16의 자료에서 나이트록스를 사용한 잠수작업에서는 감압병이 발생하지 않았음을 확인할 수 있다. 특히 나이트록스와 100% 산소를 사용한 잠수작업은 수심 30 m 이하의 잠수가 대부분이었는데, 감압병이 1건도 발생하지 않았다.

3.2.2 나이트록스와 수중 산소감압의 효과

일반적으로 산업 잠수에서는 감압의 한 형태로 Sur-D-O₂를 많이 사용한다. Sur-D-O₂는 북해에서 실시되는 잠수작업의 표준 절차로 잠수사는 잠수를 마치면 수면으로 바로 상승하고, 갑판위의 챔버에 바로 들어가서 12 m로 재압을 한

다. 해상 상태가 나쁘고 추운 지역에서 이 방법을 사용하면 잠수사의 안전을 확보할 수 있으며, 수중에서 감압하는 것보다 편안하게 감압을 수행할 수 있는 장점이 있다.

하지만 Imbert (2006)의 연구결과에 의하면 코맥스와 HSE의 자료들을 취합한 300,000회의 잠수를 분석한 결과 Sur-D-O₂ 방식이 수중 감압보다 10배나 많은 감압병을 발생시키는 경향이 있다는 것이 증명되었다. 그러므로 침매터널 잠수 작업에서는 나이트록스 사용과 함께 100% 산소를 수중 감압에 사용하였다. 100% 산소를 사용한 수중 감압은 총 101회 시행되었으며, 평균 작업 수심은 37.0 m, 평균 해저체류시간은 64분이다. 침매터널 잠수작업에서 산소를 사용한 수중 감압은 다음과 같다(Table 17).

Table 17 Summary of In-water oxygen decompression
(Busan-Geoje Fixed Link Project)

산소를 사용한 감압	101회
평균 작업 수심	37.0 m
평균 해저체류시간	64분
감압병 발생건수	없음

자료에 의하면 산소감압을 실시한 대부분 잠수작업이 Shields (1987)의 연구결과에서 감압병 발생 분포가 높은-수심 30-40 m, 60분 전후의 해저체류시간-범위에 포함되지만 감압병은 발생하지 않았다.

3.3 나이트록스와 공기의 효율성 비교

3.3.1 최적기체와 공기의 NDL 비교

이 장에서는 나이트록스와 공기의 효율성을 비교해보았다. 동일한 수심의 잠수작업에서 작업시간이 긴 기체의 효율성이 더 높다고 예상할 수 있으며, 작업시간은 각 기체의 NDL을 비교하는 방법으로 확인할 수 있다.

공기와 나이트록스의 NDL은 9-51 m까지의 수심에 대해 3 m 간격으로 구분하여 비교하였다. 최적기체를 구하기 위해 사용한 ppO_2 는 1.4이며, 공기 잠수의 NDL을 비교하기 위해서는 DCIEM 다이브 테이블을 사용하였다(DCIEM, 1992).

공기 잠수와 동일한 수심에서 나이트록스 잠수의 NDL을 구하기 위해 나이트록스의 최적기체를 구한 후 계산된 최적기체를 이용해 해당 수심에서의 EAD를 계산하였다. 생성된 EAD를 DCIEM 다이브 테이블에 적용하여 나이트록스의 NDL을 산출하였다.

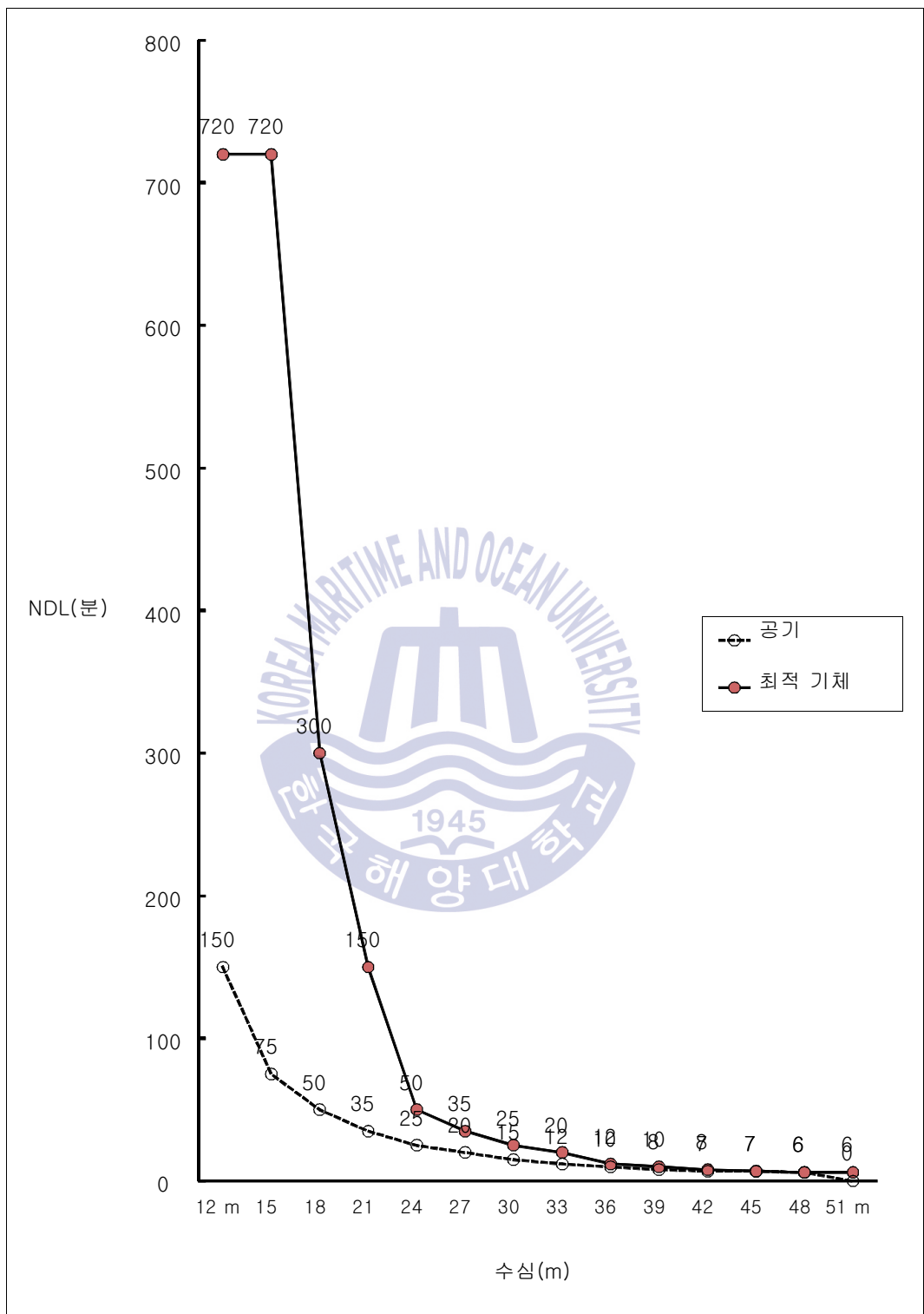
자료에 의하면 나이트록스를 사용하여 수심 15 m 이내에서 잠수작업을 하면 감압 없이 최대 12시간까지 머물 수 있다. 같은 수심에서 공기 잠수로 작업한 경우 작업시간은 75분이다. 18 m 수심에서는 공기 잠수로 최대 50분간 작업이 가능하며, 나이트록스의 경우 최대 300분간의 작업이 가능하다. 이것은 공기로 9 m에서 작업하는 것과 동일한 효과가 있다. 잠수사가 나이트록스를 사용하는 것만으로 6배의 작업시간이 연장되었다.

나이트록스와 공기 잠수의 작업시간은 24 m 수심까지는 나이트록스의 NDL이 공기보다 약 배 이상 길지만, 수심이 깊어질수록 차이는 점차 줄어들어 45 m 이후에는 NDL의 차이가 거의 같아지는 것을 알 수 있다. Table 18은 수심별로 나이트록스의 최적기체와 공기의 NDL을 비교한 것이다.

Fig. 42는 최적기체와 공기의 NDL을 비교한 그래프이다. 나이트록스의 NDL은 6-720분까지이며, 공기의 NDL은 0-150분까지이다. 그림에서 알 수 있듯이 수심 24 m 부근에서 나이트록스와 공기의 NDL이 극적으로 변화되는 것을 확인할 수 있다.

Table 18 NDL comparison of air and nitrox(using DCIEM, 1992)

수심(m)	공기 NDL(분)	나이트록스 NDL(분)	EAD (m)	최적기체 (Best Mix)
9 m	300분	-	-3.7 m	73.7%
12 m	150분	720분	0.1 m	64%
15 m	75분	720분	3.9 m	56%
18 m	50분	300분	7.7 m	50%
21 m	35분	150분	11.5 m	45%
24 m	25분	50분	15.3 m	41%
27 m	20분	35분	19.1 m	38%
30 m	15분	25분	22.9 m	35%
33 m	12분	20분	26.7 m	33%
36 m	10분	12분	30.5 m	30%
39 m	8분	10분	34.3 m	29%
42 m	7분	8분	38.1 m	27%
45 m	7분	7분	41.9 m	25%
48 m	6분	6분	45.7 m	24%
51 m	-	6분	49.5 m	23%



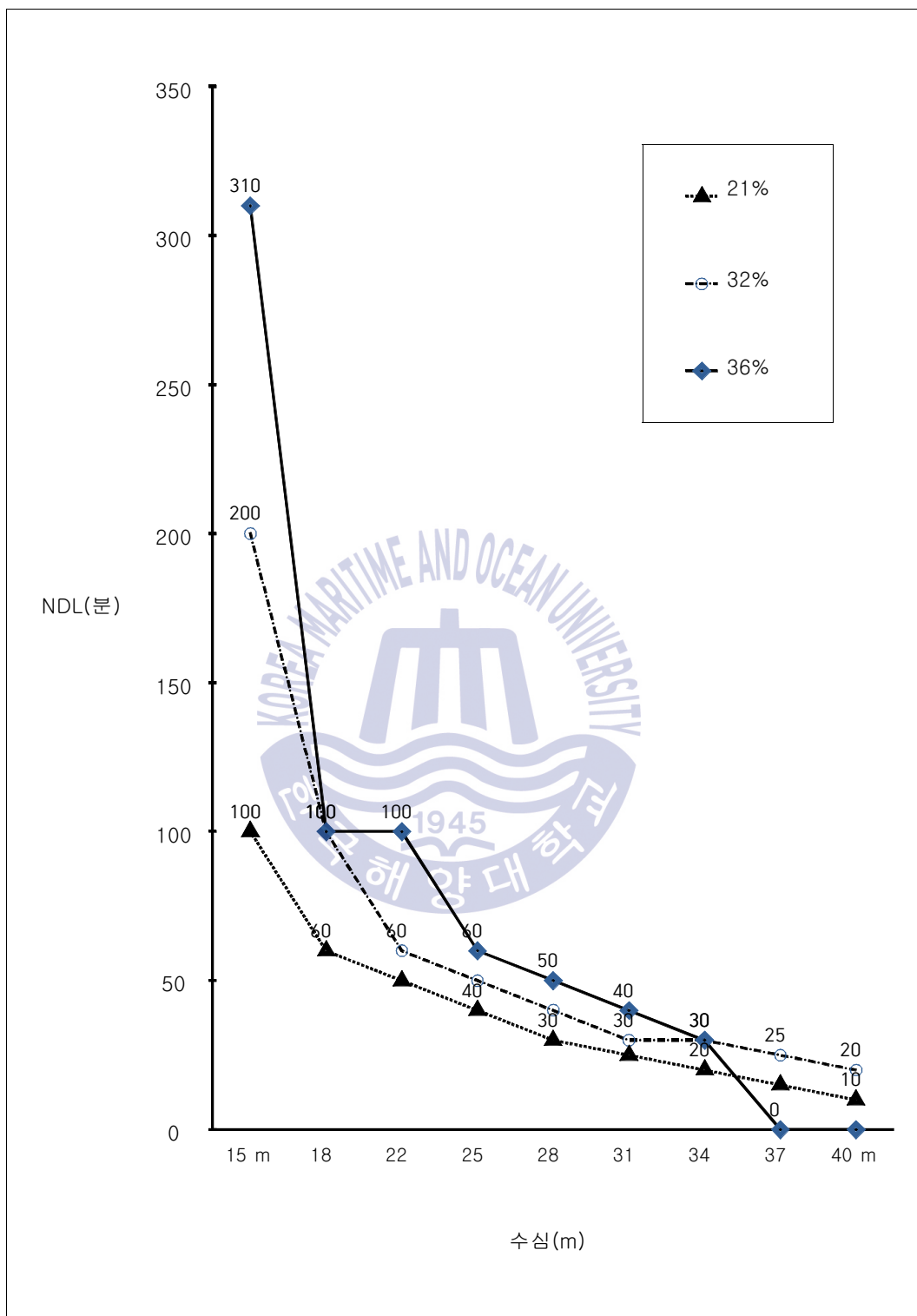
다음은 NOAA 나이트록스와 USN 공기 잠수의 NDL을 비교해 보았다. Table

19에서 수심 15 m에서 USN 공기 잠수의 NDL은 100분이고 NOAA32%의 NDL은 200분, NOAA36%의 NDL은 310분이다. 동일한 수심에서 산소의 함량만 21% → 32% → 36%로 변하였지만 각각의 NDL은 공기와 비교해 2-3배로 증가한 것을 확인할 수 있다.

Table 19 NDL comparison of USN and NOAA(Joiner, 2001)

수 심 (m)	USN 공기 잠수 NDL(분)	NOAA 32% NDL(분)	NOAA 36% NDL(분)
15 m	100	200	310
18 m	60	100	100
22 m	50	60	100
25 m	40	50	60
28 m	30	40	50
31 m	25	30	40
34 m	20	30	30
37 m	15	25	-
40 m	10	20	-

Fig. 43은 USN 공기 잠수와 NOAA 나이트록스의 NDL의 비교 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 전 구간의 수심에서 나이트록스의 NDL이 공기의 NDL과 비교해 확실히 긴 것을 확인할 수 있다.



3.3.2 나이트록스와 공기의 작업시간 비교

앞장에서는 NDL 비교를 통해 동일한 수심에서 나이트록스로 잠수하면 NDL이 증가하고 작업시간도 공기 잠수와 비교해 확실히 늘어나는 것을 확인하였다.

이번에는 나이트록스와 공기의 효율성 비교를 위한 두 번째 방법으로 실제 잠수작업에 사용한 나이트록스와 공기 잠수의 작업시간을 비교해 보았다. Table 20은 침매터널 잠수작업에서 실제 시행된 나이트록스 잠수 자료의 평균치이다. 나이트록스 잠수는 평균 27.0 m 수심에서 시행되었으며, 평균 작업시간은 66분이다. 감압을 포함한 총 작업시간은 35,022분이다.

Table 20 Nitrox diving data

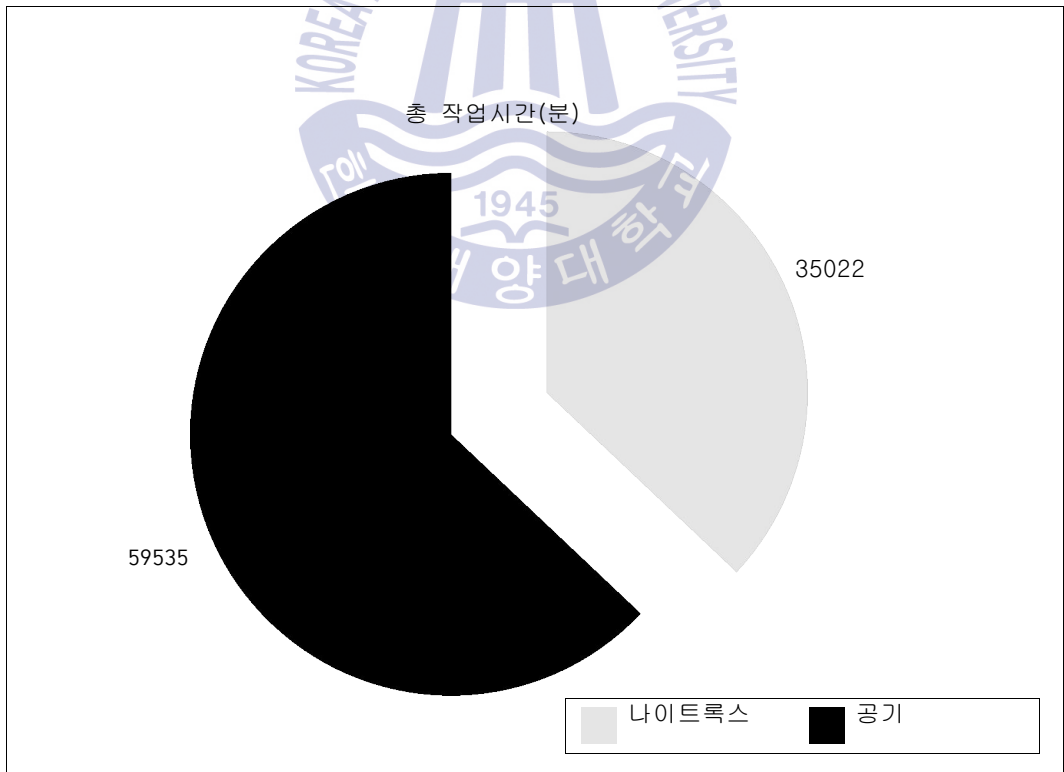
항 목	나이트록스 잠수
잠수작업 횟수	441회
평균 작업시간	66분
평균 작업 수심	27.0 m
감압을 포함한 총 작업시간	35,022분

그리고 동일한 수심에서 나이트록스와 공기 잠수의 작업시간을 비교해 보기 위해 Table 20의 잠수작업에서 나이트록스 대신 공기를 사용하여 같은 작업을 시행했다고 가정해 보았으며, 그 결과는 Table 21과 같다. 공기를 사용하여 27 m에서 66분 잠수작업을 시행하면 감압을 포함한 총 작업시간은 59,535분으로 증가한다.

Table 21 Air diving data(using HHS Software Corp, 2015)

항 목	공기 잠수
잠수작업 횟수	441회
평균 작업시간	66분
평균 작업 수심	27.0 m
감압을 포함한 총 작업시간	59,535분

Table 20과 Table 21의 결과를 Fig. 44 동일한 NDL 적용 시 기체사용량의 그래프로 표시해 보았다. 감압을 포함한 작업시간의 측면에서 나이트록스와 공기 잠수를 비교해 보면, 동일한 작업에서 공기를 사용한 작업시간이 나이트록스와 비교해 약 170% 정도 늘어나는 것을 알 수 있다.



이상의 결과는 나이트록스 잠수에 대한 Bove (2004)의 연구결과와 일치한다. 그의 연구에 의하면 동일한 수심에서 공기 대신 나이트록스를 사용하면 잠수사 체내의 잔류질소의 양이 적어져 그만큼 작업시간이 길어진다.

Fig. 45는 공기와 나이트록스 잠수의 실제 수심과 EAD를 비교한 그림이다. 그림에서 수심 20 m에서 공기와 나이트록스를 비교해 보면 EAN50의 경우 EAD가 약 10 m로 동일한 수심에서 공기 대신 나이트록스를 사용했을 뿐인데 약 10 m 낮은 수심에서 잠수하는 효과를 얻을 수 있다. 동일한 20 m 수심에서 EAN32, EAN36, EAN40을 사용해도 같은 결과를 얻을 수 있다.

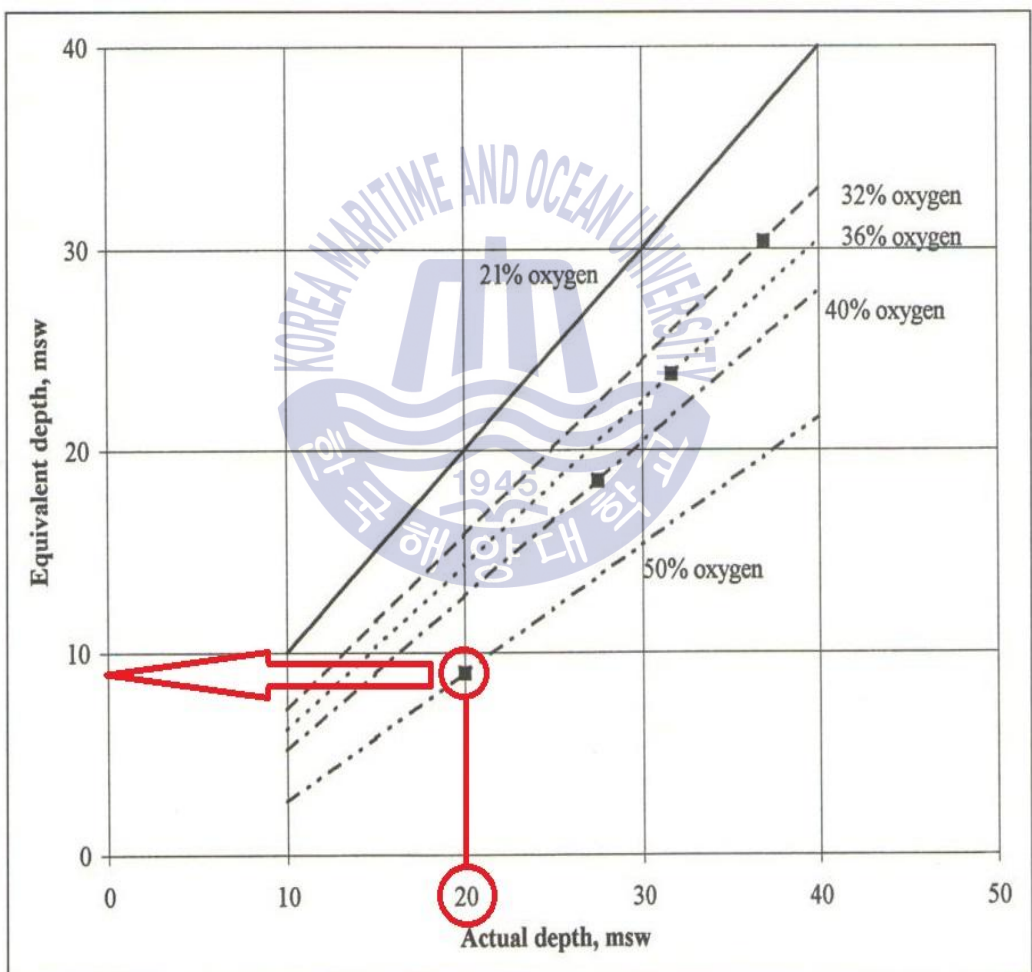


Fig. 45 Equivalent air depths for decompression with enriched air mixtures(Bove, 2004)

동일한 수심에서 사용기체에 따른 실제 수심과 EAD의 차이는 해저체류시간에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있으며, 실제 수심과 EAD의 차이는 나이트록스의 종류에 따라 동일한 수심에서 공기 대비 약 1.2-2.2배의 수치로 나타낼 수 있다. 따라서 동일한 수심에서 공기 대신 나이트록스를 사용하면 나이트록스의 종류에 따라 작업시간의 측면에서 최대 2.2배의 이득을 얻을 수 있다고 예상할 수 있다.

본 연구에서는 공기 대신 나이트록스를 사용해서 얻을 수 있는 작업시간의 이득을 작업 지연 상수라 하고, Δ WT index(different working time index)를 제안한다. Δ WT index는 1.2-2.2 범위의 수치에서 결정된다. 침매터널 잠수작업에서 나이트록스와 공기의 작업시간 차이는 약 1.7이며, Δ WT index의 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있다.

3.3.3 나이트록스와 공기의 감압 시간 비교

나이트록스와 공기의 효율성 비교를 위한 세 번째 방법으로 침매터널 잠수작업의 실제 감압 시간을 비교하고 분석해 보았다. 잠수작업의 특성상 수중에서의 작업시간이 길어질수록 그에 따른 감압 시간도 비례해서 늘어난다. 만일 나이트록스와 공기를 사용해 같은 수심에서 동일한 작업을 시행한다면 두 기체 중 감압 시간이 짧은 기체가 다른 기체보다 더 효율적이라고 예상할 수 있다.

침매터널 잠수작업에서 감압 잠수는 총 455회가 시행되었고 그중 나이트록스 잠수는 324회, 공기 잠수는 131회이다. 나이트록스와 공기 잠수의 평균 작업시간은 각각 67.1분과 56.3분이며 평균 감압 시간은 18.4분과 12.1분이었다. 동일한 수심에서 나이트록스와 공기 잠수를 비교해 보기 위해 24 m 수심을 기준으로 나이트록스와 공기를 비교해보았다. 24 m 수심에서 나이트록스 잠수작업은 20회를 실시하였으며 평균 작업시간은 68.3분이다. 같은 수심에서 공기 잠수는 10회를 실시하였고 평균 작업시간은 41.2분이다. 평균 감압 시간은 각각 11.2분과 15.2분이다. Table 22는 침매터널 잠수현장의 24 m 수심에서 나이트록스와 공기의 실제 잠수 자료이다.

Table 22 Comparison of nitrox and air diving at 24 m

항 목	나이트록스 잠수	공기 잠수
감압 횟수	20회	10회
평균 작업시간	68.3분	41.2분
평균 감압 시간	11.2분	15.2분

이상의 자료에서 동일한 수심, 24 m에서 나이트록스의 작업시간이 공기 잠수보다 약 27분 정도 더 길지만 감압 시간은 약 4분 정도 짧은 것을 확인할 수 있다. 즉, 동일한 수심에서 공기 대신 나이트록스를 사용하면 작업시간은 길어지고 감압 시간은 짧아지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 공기 대신 나이트록스를 사용해서 얻을 수 있는 감압 시간의 차이를 감압 상수라 하고, Δ DT index(different decompression time index)를 제안한다. Δ DT index는 감압 시간의 차이에 의한 수치 1.4이다.

3.4 나이트록스의 경제성 비교

이 장에서는 경제적인 측면에서 나이트록스의 효과를 비교해 보았다. 경제성 분석을 위해서는 공사 기간과 공사비용의 관점에서 나이트록스와 공기 잠수를 비교하였다.

3.4.1 공사 기간의 단축

공사 기간을 비교하기 위해서는 나이트록스를 사용한 실제 공사 기간과 공기만을 사용한 가상의 공사 기간을 비교하여 얼마만큼의 기간이 차이가 나는지 확인하였다. 동일한 조건에서 공사 기간이 짧을수록 그 기체가 경제적 이득이 있다고 예상할 수 있다.

나이트록스 잠수와 공기 잠수의 작업 기간을 계산해 보기 위해서 다음의 식(4)을 고안하였다. 공기를 사용한 잠수작업은 나이트록스를 사용한 잠수작업에 비해 체류 시간의 감소에 따른 작업 지연분과 감압의 증가에 감압 상수를 곱해 계산할 수 있다.

$$T_a = T_n \times \Delta WT \times \Delta DT \quad (4)$$

T_a = 공기잠수의 예상 작업기간

T_n = 실제 나이트록스 작업기간

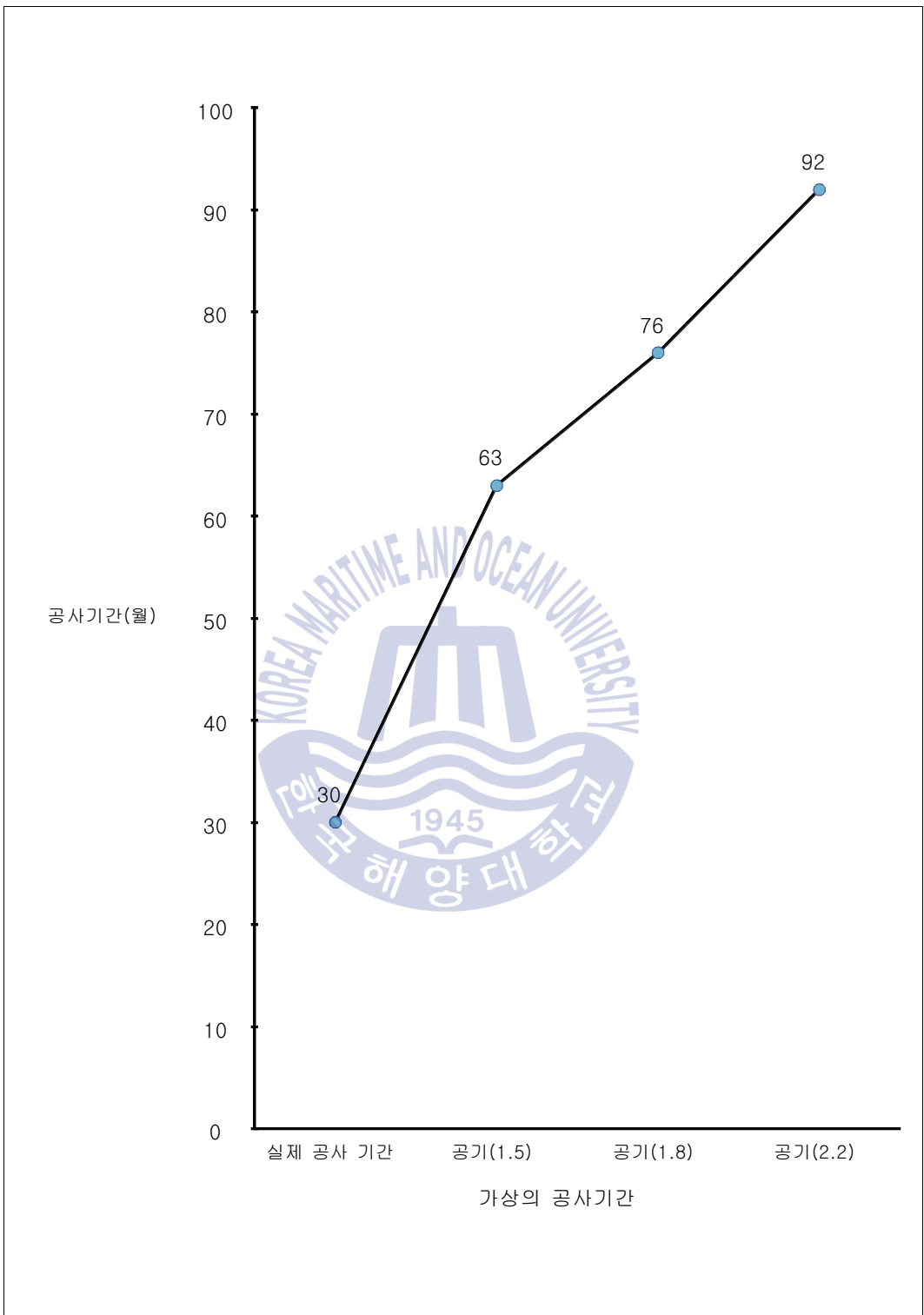
ΔWT = 작업 지연 상수

ΔDT = 감압 상수

거가대교 침매터널 현장의 잠수작업은 2008년 2월부터 2010년 8월까지 약 30개월이 소요되었다. 식(4)에 나이트록스 잠수의 실제 공사 기간인 30개월과 1.2-2.2 사이의 작업 지연 상수 그리고 감압 상수 1.4를 적용하면 공기를 사용한 예상 작업 기간을 산출할 수 있다.

Fig. 46은 실제 공사 기간과 식(4)에 의해 산출된 가상의 공기 잠수 공사 기간이다. 수평축은 나이트록스를 사용한 실제 공사 기간과 각각의 작업 지연 상수를 적용한 가상의 공기 잠수의 공사 기간을 나타내며, 작업 지연 상수는 1.5, 1.8, 2.2를 적용하였다. 작업 지연 상수를 1.5로 적용했을 때 예상 공사 기간은 63개월이다. 작업지연 상수를 1.8로 적용했을 때 예상 공사 기간은 76개월이며, 작업 지연 상수를 2.2로 적용했을 때의 공사 기간은 92개월로 나왔다.

공기를 사용한 잠수작업의 최대 공사 기간은 92개월로 나이트록스를 사용한 잠수작업인 30개월과 비교해 보면 작업 기간이 약 3.0배 이상 길어지는 것을 예상할 수 있으며, 약 60개월 이상의 공사 지연으로 인한 경제적 손실과 사회적 손실이 발생했을 것이다.



3.4.2 공사비용의 절감

이 장에서는 공사비용의 측면에서 나이트록스의 효과를 비교해 보았다. 현재 까지도 국내 산업 잠수 업계는 작업의 종류 및 기간에 따라 잠수작업 단가의 기준이 다르고 정부에서 발간하는 표준품셈표의 잠수사 단가도 현실과는 맞지 않는다. 최근 세월호 잠수 현장의 민간 잠수사의 단가는 국제 구난 협회(ISU: International Salvage Union) 기준단가와 전문가의 의견을 거쳐 1일 비용이 98만 원으로 책정된 사례가 있었다(중앙일보, 2014).

본 논문에서도 잠수사의 적정 단가를 적용하기 위해 국제적으로 통용되는 2건의 Tariff를 참고하였다. Table 23은 영국 Lloyd의 SCOPIC(Special Compensation P&I Clubs) tariff와 일본 Nippon Salvage의 tariff이다. 국제적으로 잠수감독관과 잠수사의 1일 비용은 대략 100-140만 원 선에서 책정된다고 볼 수 있다.

Table 23 Daily tariff rates

항 목	The daily tariff rate	
	Diving supervisor	Diver
SCOPIC Appendix A (Lloyds, 2014)	US\$ 1,356	US\$ 1,217
Tariff for Salvage (Nippon salvage, 2011)	¥106,500	¥97,500

나이트록스 잠수작업과 공기 잠수의 공사비용을 비교해 보기 위해 3.4.1의 나이트록스와 공기의 공사 기간 비교에 평균단가 1일 120만 원을 적용하여 예상 공사금액을 계산해 보았다. 30개월간 나이트록스를 사용한 공사작업에 소요된 잠수사의 임금은 약 320억이었다. 나이트록스 대신 공기 잠수로 바꾸어 Δ WT index와 Δ DT index를 적용하면 최대 소요 비용은 약 960억으로 증가한다.

이상의 결과에서 만일 침매터널 잠수작업에서 나이트록스 대신 공기로 잠수작업을 시행했다면 최대 600억 이상의 예산이 추가로 지출됐을 것이라고 예상할 수 있다. Table 24는 나이트록스와 공기 잠수의 공사금액 비교이다.

Table 24 Cost comparison of air and nitrox diving

항 목	공사 기간	공사금액
실제 거가대교 침매터널 잠수 작업 기간	30개월	₩32,400,000,000
공기 잠수 공사 기간 (Δ WT index 1.5 적용)	63개월	₩68,040,000,000
공기 잠수 공사 기간 (Δ WT index 1.8 적용)	76개월	₩81,648,000,000
공기 잠수 공사 기간 (Δ WT index 2.2 적용)	92개월	₩99,792,000,000

나이트록스와 공기 잠수의 공사금액의 정확한 비교를 위해서는 Table 24외에 추가되는 장비들도 고려해야 한다. 추가 장비로는 2.3.2장의 나이트록스 혼합 장비에서 예산과 조건에 맞는 장비를 선택해야 하며, 나이트록스 기체의 저장과 이송을 위한 장치가 필요하다.

Table 25에 공기 잠수와 나이트록스 잠수에 필요한 기본적인 장비를 비교해 보았다. 대부분 장비는 공통으로 사용하며, 나이트록스 잠수를 위한 Mixed gas control panel, Nitrox bank, Nitrox generator 등의 몇 가지 장비가 추가로 필요하다. 하지만 공사 기간이 길어진다면 추가 장비로 인한 비용의 영향은 적어지고 전체 공사비용에서 차지하는 비율도 미비하다.

Table 25 Minimum required diving equipments for air/nitrox(IMCA, 2014a)

항 목	공기 잠수	나이트록스 잠수
공통 장비	L.P. Air compressor	L.P. Air compressor
	H.P. Air compressor	H.P. Air compressor
	60" Twin Lock Deck Decompression Chamber with H.P. air storage bank	60" Twin Lock Deck Decompression Chamber with H.P. air storage bank
	LARS or A frame	LARS
	Wet bell or Man-riding basket	Wet bell
	Hydraulic power unit	Hydraulic power unit
	Communication radio	Communication radio
	CCTV system	CCTV system
	Diving helmet	Diving helmet
	Diver heating systems	Diver heating systems
	Divers' umbilical: -1/2" Hot water hose -3/8" Main gas hose -1/4" Pneumo hose -comm's cable, video cable	Divers' umbilical: -1/2" Hot water hose -3/8" Main gas hose -1/4" Pneumo hose -comm's cable, video cable
추가 장비	Gas control panel	Mixed gas control panel with distribution
	Volume tank	Oxygen system
	Gas cylinders or Large storage air bank	Gas cylinders or Large storage air bank
		Nitrox generator, Gas mixer and Gas blender

제 4 장 분석 결과

4.1 나이트록스의 안전성 분석 결과

거가대교 침매터널 구간은 50 m에 이르는 깊은 바다 수심과 낙동강 하구의 연약지반, 가덕 수로의 빠른 조류 등의 열악한 환경과 3년간의 긴 공사 기간 때문에 다른 작업 현장보다 잠수사에게 발생할 수 있는 감압병이나 잠수 관련 질병의 위험이 컸다. 나이트록스 사용으로 인한 안전성 측면에서의 이득, 특히 감압병 발생률과의 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

침매터널 잠수작업에서 감압병 발생률은 0.307%로, 전체 651회의 잠수작업 중 공기를 사용한 잠수에서 2건의 감압병이 발생하였다. 이 수치는 감압병에 발생에 관한 Shields (1987)의 연구결과의 감압병 발생률과 일치한다.

나이트록스를 사용한 잠수작업에서 감압병이 발생하지 않은 또 다른 이유로 100% 산소를 이용한 수중 산소감압의 효과도 있다. 특히 나이트록스와 100% 산소를 사용한 잠수는 대부분 30 m 이하의 수심에서 시행되었는데 감압병이 1 건도 발생하지 않았다. 이것은 나이트록스와 산소를 사용한 잠수작업이 공기를 사용하는 잠수작업보다 훨씬 안전하다는 것을 확인시켜주었다고 할 수 있다.

감압병의 발생에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나는 잠수감독관의 역할이다. 감압병의 발생원인 분석에 대한 Childs (1988)의 연구결과는 감압병 발생 요인에 잠수감독관의 역할이 얼마나 중요한지를 잘 보여준다. 그의 연구결과에 따르면 감압병 발생의 가장 큰 원인으로 잘못된 다이브 테이블의 사용이었다. 두 번째 원인은 잠수감독관의 실수로 감압을 시행하지 못해서 감압병이 발생한 경우였다. 잠수작업 중 감압병 발생의 가장 큰 원인을 제공하는 위의 2가지 사항은 모두 잠수작업을 관장하는 잠수감독관의 잘못으로 발생하였다. Table 26은 감압병의 주요 발생 원인이다.

Table 26 Case demonstrating causative and/or provocative factors and other external factors(Childs, 1988)

발생건수(건)	감압병 발생원인
8 건	수심 및 잠수 시간이 맞지 않는 다이브 테이블 사용.
6 건	잠수감독관의 실수로 감압 미시행.
3 건	잠수사의 감압병의 징후를 무시하고 감압 시행.
2 건	잠수사의 상승 속도 초과로 인한 문제.
2 건	수중 작업시간 초과.
2 건	수중에서 문제 발생으로 체류시간 증가.
2 건	작업 수심의 변화.
1 건	수중 감압 도중 강한 조류로 인한 문제.
1 건	작업 도중 잠수사의 갑작스러운 상승으로 인한 문제.
1 건	챔버 감압 도중 산소 공급의 지연으로 인한 문제.

잠수작업 중에 잠수감독관은 항상 잠수사의 작업 수심과 최대 수심을 확인하여야 하며, 만일 어떤 원인에 의해 잠수사의 작업 수심에 변화가 생기면 즉시 육상의 잠수감독관에게 보고할 수 있도록 해서 그에 맞는 감압 계획을 수정해야 한다.

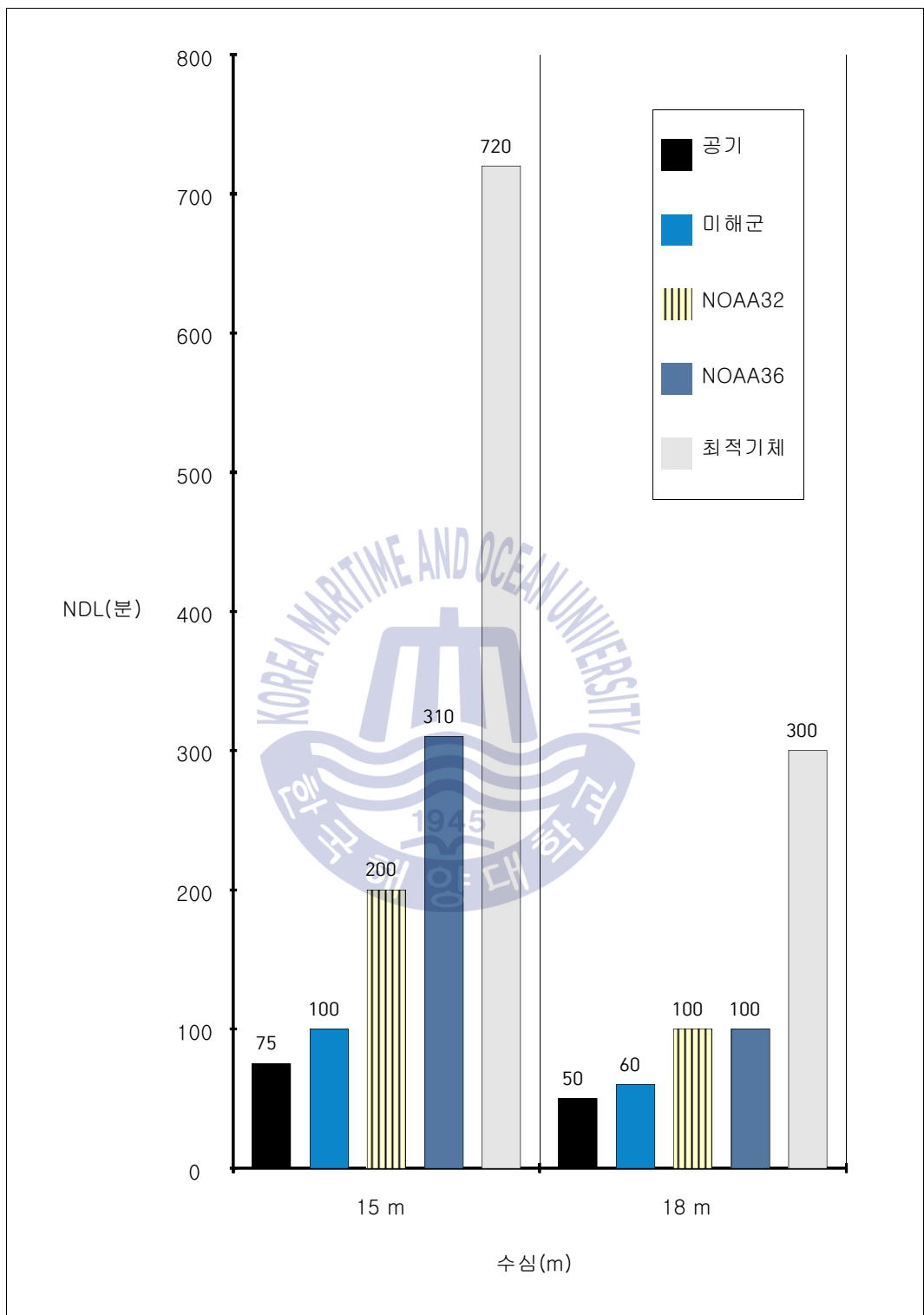
잠수감독관은 주어진 작업을 끝내야 하는 의무도 있지만 그에 못지않게 잠수팀의 안전을 책임져야 할 의무도 있다. 이런 자질을 갖추기 위해 잠수감독관은 일정 기간 이상의 현장 경험을 쌓아야 하며, 후에 검증된 훈련 기관에서 잠수감독관으로 알아야 할 최소한의 교육을 이수하여야 한다. 또한 잠수감독관은 잠수작업 계획 수립에 있어 적어도 2가지 이상의 다이브 테이블을 비교해 보고 보다 안전하고 보수적인 다이브 테이블을 선택하는 것도 좋은 대안이 될 것이며, 철저하게 다이브 테이블에 따라 작업을 진행해야 한다.

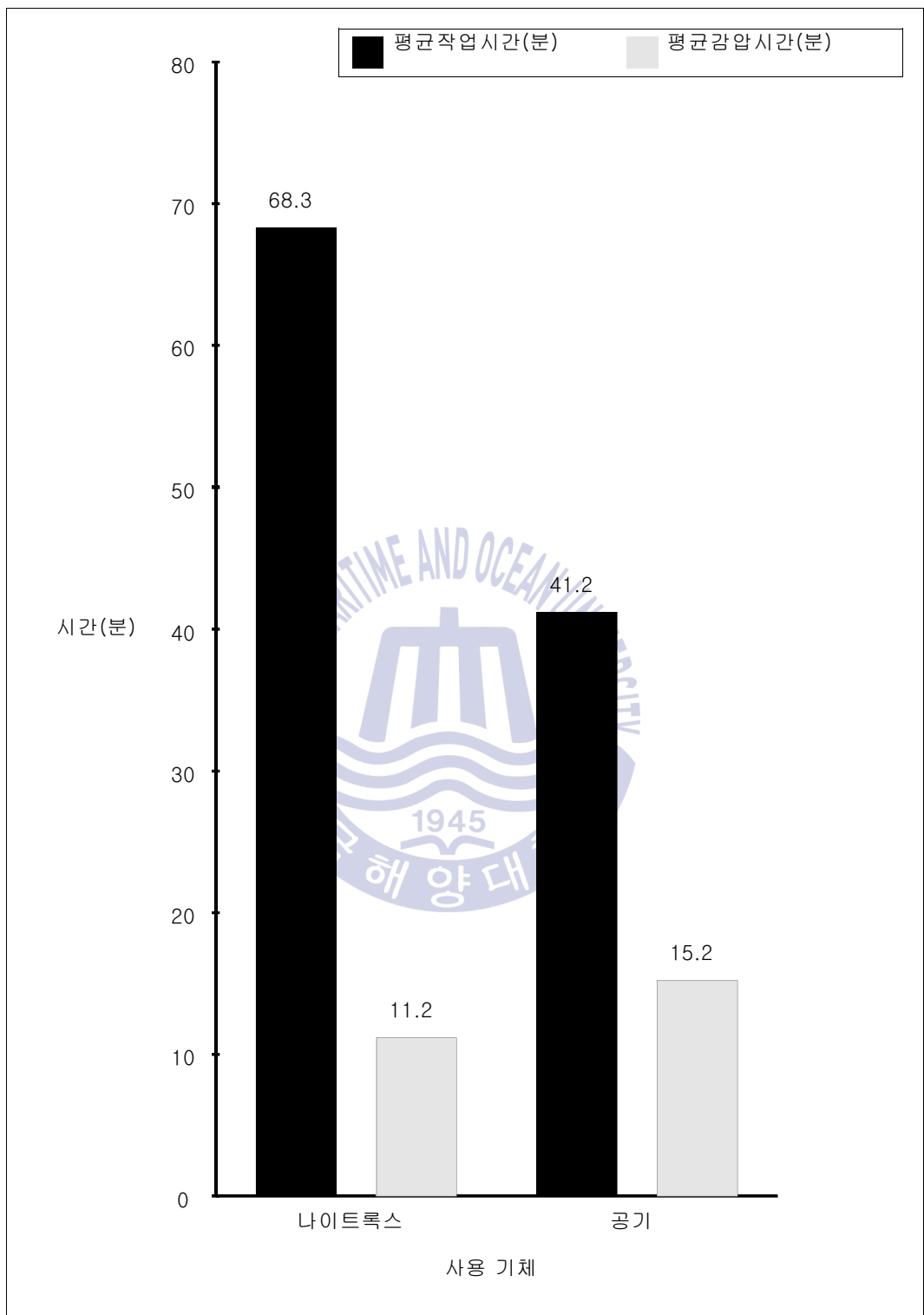
4.2 나이트록스의 효율성 분석 결과

효율성의 측면에서 나이트록스와 공기 잠수를 분석한 결과는 다음과 같다. 공기 대신 나이트록스를 사용하면 첫째, NDL이 증가한다. 둘째, 잠수작업시간이 증가한다. 셋째, 감압 시간이 감소한다.

NDL 증가는 각 기체를 통합적으로 비교한 결과에서도 확인할 수 있다. Fig. 47에 15 m와 18 m의 수심에서 나이트록스 최적기체와 NOAA32, NOAA36, USN 공기 잠수, DCIEM 공기 잠수의 NDL을 각각 비교하였다. 수직축은 각 기체의 NDL을 나타내며, 수평축은 15 m와 18 m 수심에서 각 기체를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최적기체의 NDL이 가장 길게 나타났으며, 공기의 NDL과 비교하면 약 10배의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

나이트록스 사용으로 인한 작업시간과 감압 시간의 변화는 Fig. 48의 그래프에서 확인할 수 있다. Fig. 48은 24 m 수심에서 나이트록스와 공기 잠수의 작업시간과 감압 시간을 같이 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 수심의 잠수작업에 공기 대신 나이트록스를 사용하면 수중 작업시간은 증가하고 그와 반비례해 감압 시간은 감소하는 것을 확인할 수 있었다.





나이트록스 사용으로 인한 효율성 변화의 결과를 Table 27에 정리하였다. 평

균수심에서 공기 대신 나이트록스를 사용하면 NDL은 25분에서 50분으로 약 100% 증가하였다. 수중 작업시간은 공기의 사용시간이 나이트록스 대비 약 170% 증가하여 공사 기간이 지연됨을 확인하였다. 반면 감압 시간은 약 135% 감소하였다.

Table 27 Work efficiency in the average depth

항 목	나이트록스	공기	변화량
NDL	50분	25분	100% 증가
작업시간	35,022분	59,535분	약 170% 증가
감압 시간	11.2	15.2	약 135% 감소

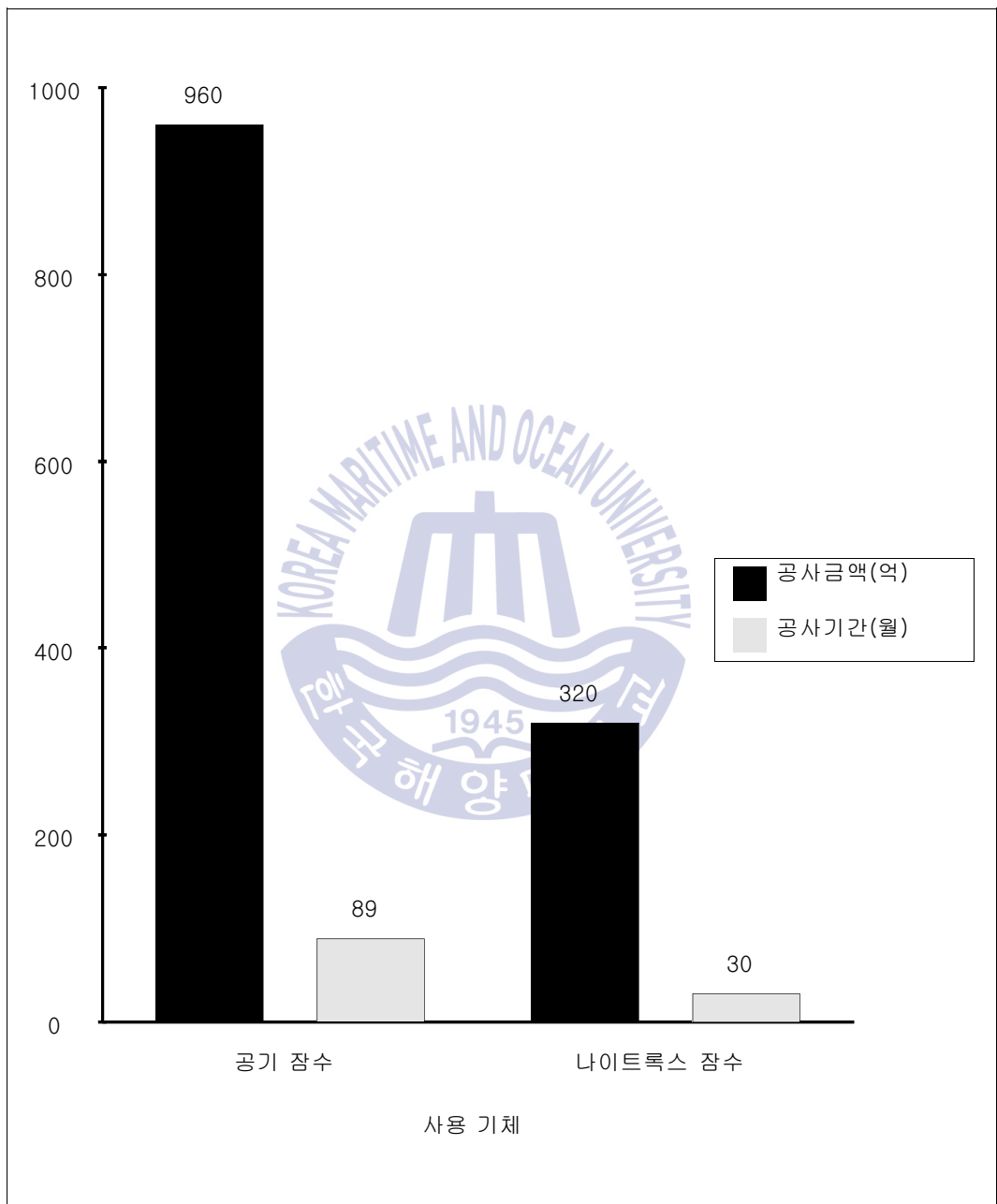
4.3 나이트록스의 경제성 분석 결과

경제적 측면에서 나이트록스와 공기 잠수의 차이를 분석한 결과는 다음과 같다. 나이트록스와 공기 잠수의 공사 기간의 차이는 약 3.0배 정도로 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 비례해 공사비용도 증가한다. **Fig. 49**는 나이트록스와 공기 잠수의 공사 기간과 공사금액을 비교한 결과이다. 여러 가지 요건들을 고려하더라도 그림의 결과와 크게 차이가 나지 않을 것이다.

전체적인 공사금액을 비교하기 위해서는 단순히 잠수사의 임금 외에 몇 가지 조건을 추가로 고려해야 한다. 우선 나이트록스 기체 혼합을 위한 장비가 추가되어야 한다. 2.3.2장에서 언급한 여러 가지 종류의 나이트록스 혼합 장비에서 예산과 조건에 맞는 장비를 선택해야 하며, 추가로 나이트록스 기체의 저장과 이송을 위한 장치가 필요하다.

하지만 공사 기간이 길어질수록 장비의 추가 비용의 영향은 적어지게 되며, 전체 공사비용에서 차지하는 비율도 미비하다. 또한 작업 초기에 나이트록스

장비의 추가로 인한 비용 부담보다 반복적인 공기 잠수로 인해 발생할 수 있는 예상치 못한 문제나 잠수사의 생리학적인 문제, 감압 시간 증가로 인한 문제로 인한 부작용이 더 크게 될 것이다.



제 5 장 결 론

지금까지 거가대교 침매터널 잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례를 분석해 보았다. 나이트록스의 이론상 장점과 잠수 현장에서 실제 사용하는 기체로서의 차이를 비교한 결과 산업 잠수에 효과적인 기체로 쓰일 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 시작하면서 제시하였던 연구의 문제에 대한 결과는 다음과 같다.

첫째, 잠수사가 호흡 기체로 나이트록스를 사용하고 감압 기체로 100% 산소를 사용한다면 감압병의 발생 확률을 최소화할 수 있으며, 감압 시간 또한 단축하게 할 수 있음을 확인하였다. 특히 감압병 발생률이 증가하는 수심 30 m 이하의 잠수작업에 사용한다면 감압병 예방에 효과적일 것이다. 또한 본 연구 중에 확인한 공기 잠수에서의 감압병 발생률 수치, 0.307%는 추가 연구를 통해 증명할 필요가 있을 것이다.

둘째, 동일한 수심에서 나이트록스를 사용하면 공기 잠수와 비교하여 작업시간은 명백히 증가하고 또한 잠수작업 후 잠수사의 체내에 남아있는 잔류질소의 양도 적어진다.

셋째, 나이트록스를 사용한 실제 공사 기간과 공기 잠수의 가상 작업 기간을 비교하여 공사 기간의 단축과 공사비용의 절감이 이루어졌음을 확인하였다. 나이트록스를 사용하면 신속한 작업 진행과 작업 소요비용 절감에 큰 영향을 줄 수 있을 것이라 사료된다.

현재까지 우리나라 산업 잠수 업계는 공기 잠수에 국한되어 왔다. 본 연구는 국내 산업 잠수 수중공사 현장에서 국제 규정을 준수하며 나이트록스를 사용한 최초의 사례였다. 본 연구결과가 국내 산업 잠수 업계에 나이트록스를 알릴 수 있는 계기가 되길 바라며, 앞으로 산업 잠수에서의 나이트록스 사용에 대한 지속적인 후속 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 강신영, 2010. 과학 잠수 인증제도의 국내 도입 필요성에 관한 연구. *한국마린 엔지니어링학회지*, 35(1), pp.118-125.
- 두산백과, 2011. *거가대교*. [Online] Available at: <http://www.doopedia.co.kr> [Accessed 10 Dec 2014].
- 중앙일보, 2014. ‘세월호’ 민간잠수사 수난구호비 일당 98만원 지급. [Online] Available at: http://article.joins.com/news/article/article.asp?total_id=14987553&ctg=1200. [Accessed 25 Feb 2015].
- 해양의료원, 2002. *잠수의학*. 2nd Ed. 해양의료원: 진해.
- Acott, C.J., 1999. Oxygen toxicity a brief history of oxygen in diving. *Diving and Hyperbaric Medicine*, [online] Available at: <<http://archive.rubicon-foundation.org/6014>> [Accessed 15 Apr 2015].
- Association of Diving Contractors International (ADCI), 2014. *International consensus standards for commercial diving and underwater operations*. 6.1 Ed. ADCI: Houston.
- Bjorkman, B.J., 2007. Blending oxygen enriched air. [e-book] Canada: Enviro dive services. Available through: <<http://envirodive.com>> [Accessed 10 Jan 2015].
- Bove, A.A., 2004. *Bove and Davis' Diving Medicine*. 4th Ed. Saunders: Philadelphia.
- British Compressed Gases Association (BCGA), 2012. *TIS-6 Cylinder Identification Colour Coding and Labelling Requirements*, London: BCGA.

Childs, C.M., 1988. Clinical Presentations and Significance of Decompression Sickness: an Analysis of Incidents from Commercial Diving Operations 1977-87. *Proceeding of an international conference (Subtech '87)*. Aberdeen, November 10-12, 1987, Society of Underwater Technology: UK.

Coen, T., 2015. *Shearwater and the CNS Oxygen Clock*. [Online] Available at: <http://www.shearwater.com/news/shearwater-and-the-cns-oxygen-clock/> [Accessed 25 Mar 2015].

Defense and Civil Institute of Environmental Medicine (DCIEM), 1992. *DCIEM diving manual*. Universal dive techtronics, Inc.: CANADA.

Edmonds, C. McKenzie, B. Thomas, R. & Pennefather, J., 2013. *Diving medicine for scuba divers*. [e-book] Australia: Carl Edmonds. Available through: <<http://divingmedicine.info>> [Accessed 12 Dec 2014].

HHS Software Corp, 2015. *V-planner commercial diver*. [Online] Available at: <http://www.hhssoftware.com/v-planner-cde/index.html>. [Accessed 20 Jan 2015].

High, W.L., 2001. *Inspecting cylinders*. 4th Ed. PSI Inc: Washington.

Imbert, J.P., 2006. Commercial diving: 90msw operational aspects. In: Lang, MA and Smith, NE (eds), *Proceeding of Advanced Scientific Diving Workshop*. Washington DC, February 23-24, 2006, Smithsonian Institution: Washington.

International Marine Contractors Association (IMCA), 1987. *AODC 047 The Effects of Underwater Currents on Divers' Performance and Safety*,

London: IMCA.

International Marine Contractors Association (IMCA), 2003a. *D 031 Cleaning for oxygen service setting up facilities and procedures*, London: IMCA.

International Marine Contractors Association (IMCA), 2003b. *D 033 Limitations in the use of SCUBA offshore*, London: IMCA.

International Marine Contractors Association (IMCA), 2007. *D 043 Marking and*

Colour Coding of Gas Cylinders, Quads and Banks for Diving Applications, London: IMCA.

International Marine Contractors Association (IMCA), 2014a. *D 018 The initial and periodic examination, testing and certification of diving plant and equipment*, London: IMCA.

International Marine Contractors Association (IMCA), 2014b. *D 022 Guidance for diving supervisors*, London: IMCA.

Joiner, J.T., 2001. *NOAA diving manual*. 4th Ed. Best publishing company: USA.

Lippmann, J., 1992. *Oxygen first aid for divers*. J. L. Publications: Australia.

Lloyds, 2014. *SCOPIC Clause tariff Appendix A*. [pdf] London: Lloyds. Available at: <http://www.lloyds.com/Search?q=scopic> [Accessed 12 Feb 2015].

Naval Sea System Command, 2008. *U. S. Navy Diving manual*. 6th Ed. NAVSEA: Florida.

Nitrotech, 2015. *Technology*. [Online] Available at: <http://www.nitrotech.no/technology> [Accessed 20 Feb 2015].

Oxygen Generating Systems Intl, 2015. *Pressure swing adsorption technology*. [Online] Available at: http://www.ogsi.com/index.php?src=gendocs&ref=pressure_swing_adsorption_technology&category=OGSI%20About [Accessed 1 May 2015].

Rutkowski, D., 1994. *Enriched air nitrox*. IANTD: Florida.

Shields, T.G., 1987. Decompression Sickness in Commercial Air Divers. *Proceeding of an international conference (Subtech '87)*. Aberdeen, November 10–12, 1987, Society of Underwater Technology: UK.

Voss, B.V., 2003. Oxygen and its effects on the diver. In: T. Mount, eds. 1998. *Technical diver encyclopedia*. International Association of Nitrox & Technical. Ch.7.